



Universidad
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Sistema de control antivuelco para camión utilizando lógica difusa y suspensión activa

Autor: D. Andrés Riofrío Aparicio
Tutora: Dra. Dña Beatriz López Boada

Junio de 2015



A mis padres y compañeros del 19.



Resumen

En este proyecto se ha desarrollado un sistema de control antivuelco para un sistema de suspensión activa equipado en un camión ligero. Los sistemas de suspensión activa se componen de una serie de actuadores que permiten compensar las fuerzas que aparecen durante la circulación de un vehículo con el fin de mantener el conjunto equilibrado.

El software TruckSim permite simular el comportamiento dinámico del vehículo, así como recoger información relativa acerca de distintas variables, como pueden ser el ángulo de vuelco o la velocidad a la que éste se produce.

Los datos obtenidos se envían al programa diseñado utilizando Matlab – SIMULINK. Mediante el uso de la lógica difusa, los datos se procesan y se crea una señal que se devuelve de forma automática a TruckSim. La lógica difusa se utiliza como herramienta para diseñar la respuesta necesaria por parte de los actuadores.

Esta señal es portadora de la información requerida por cada uno de los actuadores. De esta forma pueden ejercer una fuerza distinta dependiendo de los datos que vienen del camión.

Para determinar la mejor configuración del sistema, se han realizado diferentes ensayos en entornos muy distintos. Estos ensayos incluyen desde tests de giro en terrenos llanos, como puede ser un aeródromo, hasta simulaciones a distintas velocidades en carreteras que simulan condiciones reales. Cada uno de los test se repite con diferentes configuraciones del sistema, que permiten ejercer fuerzas diferentes en el eje delantero y trasero del vehículo.

La comparación de los resultados obtenidos en cada simulación se realiza mediante un coeficiente de transferencia de carga, que indica, en cada instante de tiempo, el porcentaje del peso total del camión soportado por cada lado.



Abstract

In this project a controller has been developed for an anti rollover system which uses active suspension for a light truck. Active suspension systems are formed by a set of actuators which compensate the forces which appear during a ride in order to keep the vehicle balanced.

Using the software TruckSim it is possible to simulate the dynamic behavior of the vehicle, as well as gathering information about different variables, such as the roll angle or roll rate for each of the instances belonging to the simulation.

The data gathered by TruckSim is sent to a program designed in MATLAB – SIMULINK. By means of fuzzy logic, this information is processed and a signal is created. This signal is sent automatically back to TruckSim. Fuzzy logic is used as a tool to design the response required from the actuators.

This signal carries the information needed by each of the actuators in order to work. This way, depending on the value of the variables which come from the truck, it is possible to exert a different force.

In order to find out the best set up for the system, a series of different tests in different environments are simulated. These tests include from steering tests in flat airfields to simulations at different speeds in real roads. Each of the tests is repeated with different configurations of the system, applying different forces in the front and rear axles.

The comparison of results from each simulation is done by means of a load transfer coefficient, which indicates at every moment the percentage of the vehicle's weight withstood by each side of the truck.



Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO	11
1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	12
2. SISTEMAS ANTIVUELCO EN VEHÍCULOS INDUSTRIALES	13
2.1. EARLY WARNING ROLLOVER (EWR).....	13
2.2. TRAILER ROLL STABILITY (TRS) - HALDEX.....	13
2.3. ROLL STABILITY SUPPORT (RSS)	14
2.4. ACTIVE ROLLOVER PROTECTION (ARP)	14
3. LA SUSPENSIÓN COMO SISTEMA DE ACTUACIÓN	15
3.1. SUSPENSIÓN SEMIACTIVA.....	15
3.1.1. <i>Amortiguadores magnetoreológicos</i>	16
3.1.2. <i>Amortiguadores electrorreológicos</i>	17
3.1.3. <i>Dynamic ESA</i>	17
3.2. SUSPENSIÓN ACTIVA.....	18
3.2.1. <i>Actuadores neumáticos e hidráulicos</i>	18
3.2.2. <i>Suspensión Hidroneumática</i>	19
3.2.3. <i>Active Body Control (ABC)- Mercedes Benz</i>	20
3.2.4. <i>DRC Audi</i>	20
3.2.5. <i>Suspensión activa "Bose"</i>	21
4. LÓGICA DIFUSA.....	23
4.1. FUNCIONES DE INCLUSIÓN DE CONJUNTOS DIFUSOS	24
4.1.1. <i>Particiones difusas</i>	25
4.1.2. <i>Reglas difusas</i>	25
4.2. SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO	26
4.3. LÓGICA DIFUSA EN EL ENTORNO MATLAB / SIMULINK.....	27
4.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL ANTIVUELCO	28
4.4.1. <i>Variables de entrada al los bloques FLC</i>	29
4.4.2. <i>Valores de salida de los bloques FLC</i>	30
4.4.3. <i>Juego de reglas utilizado</i>	31
5. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ANTIVUELCO	33
5.1. CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO MODELADO	33
5.2. BLOQUE "TRUCKSIM S-FUNCTION"	36
5.2.1. <i>Parámetros de salida</i>	37
5.2.2. <i>Parámetros de entrada</i>	38
5.3. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA NORMALIZADO (CTC).....	38
5.4. SISTEMA AUXILIAR: DETECTOR DE PERALTE.....	40
5.5. APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA	42
5.6. MODIFICACIÓN DEL SISTEMA. TIPOS DE SISTEMAS.....	42
5.6.1. <i>Sistema Pasivo</i>	42
5.6.2. <i>Sistema Activo 1</i>	43
5.6.3. <i>Sistema Activo 2</i>	44
5.6.4. <i>Sistema Activo 3</i>	44
5.7. SISTEMA COMPLETO	45
6. TIPOS DE ENSAYOS REALIZADOS	47
6.1. ENSAYO 1: GIRO DE 180° DE VOLANTE SOBRE SUPERFICIE PLANA	47
6.2. ENSAYO 2: ANZUELO	49
6.3. ENSAYO 3. CIRCUITO CERRADO CON PENDIENTE Y PERALTE.....	51
6.4. ENSAYO 4: "CIRCUITO EN 8"	53



6.5.	ENSAYO 5: CARRETERA REAL	54
7.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN	56
7.1.	SISTEMA PASIVO	56
7.1.1.	<i>Sistema Pasivo – Ensayo 1</i>	56
7.1.2.	<i>Sistema Pasivo – Ensayo 2</i>	59
7.1.3.	<i>Sistema Pasivo – Ensayo 3</i>	60
7.1.4.	<i>Sistema Pasivo – Ensayo 4</i>	61
7.1.5.	<i>Sistema Pasivo – Ensayo 5</i>	64
7.2.	SISTEMA ACTIVO 1	66
7.2.1.	<i>Sistema Activo 1 – Ensayo 1</i>	66
7.2.2.	<i>Sistema Activo 1 – Ensayo 2</i>	68
7.2.3.	<i>Sistema Activo 1 – Ensayo 3</i>	69
7.2.4.	<i>Sistema Activo 1 – Ensayo 4</i>	71
7.2.5.	<i>Sistema Activo 1 – Ensayo 5</i>	73
7.3.	SISTEMA ACTIVO 2	76
7.3.1.	<i>Sistema Activo 2 – Ensayo 1</i>	76
7.3.2.	<i>Sistema Activo 2 – Ensayo 2</i>	78
7.3.3.	<i>Sistema Activo 2 – Ensayo 3</i>	79
7.3.4.	<i>Sistema Activo 2 – Ensayo 4</i>	79
7.3.5.	<i>Sistema Activo 2 – Ensayo 5</i>	81
7.4.	SISTEMA ACTIVO 3	84
7.4.1.	<i>Sistema Activo 3 – Ensayo 1</i>	84
7.4.2.	<i>Sistema Activo 3 – Ensayo 2</i>	85
7.4.3.	<i>Sistema Activo 3 – Ensayo 3</i>	86
7.4.4.	<i>Sistema Activo 3 – Ensayo 4</i>	87
7.4.5.	<i>Sistema Activo 3 – Ensayo 5</i>	89
7.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	91
8.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	95
8.1.	CONCLUSIONES	95
8.2.	TRABAJOS FUTUROS	96
9.	REFERENCIAS	97



Índice de figuras

Figura 1. ECU del sistema TRS	14
Figura 2. Esquema de suspensión convencional frente a una suspensión semiactiva.....	15
Figura 3. Representación Fuerza – Velocidad en un amortiguador convencional.....	16
Figura 4. Representación de la reorganización de las partículas magnéticas.....	17
Figura 5. Esquema de configuración de una suspensión activa	18
Figura 6. Esquema de una suspensión hidroneumática.	19
Figura 7. Citroën DS de 1954 en posición elevada y con el motor apagado respectivamente	19
Figura 8. Mercedes Clase S equipado con un prototipo del sistema ABC	20
Figura 9. Esquema del circuito hidráulico diagonal.....	21
Figura 10. Comparativa entre un vehículo sin sistema de suspensión activa BOSE y uno equipado con él.....	21
Figura 11. Módulo delantero de suspensión activa BOSE	22
Figura 12. Ponderación Blanco - Negro.....	23
Figura 13. Ejemplo de función de pertenencia triangular	24
Figura 14. Particiones difusas.....	25
Figura 15. Dispositivo de control FLC.....	26
Figura 16. Fuzzy logic toolbox	27
Figura 17. Ejemplo de sistema de control en SIMULINK []	28
Figura 18. Funciones utilizadas para el ángulo de vuelco	29
Figura 19. Funciones utilizadas para la velocidad de vuelco	30
Figura 20. Configuración de funciones para los parámetros de salida (actuador derecho).....	31
Figura 21. Configuración de funciones para los parámetros de salida (actuador izquierdo).....	31
Figura 22. Imagen del camión modelado para los ensayos.....	33
Figura 23. Esquema de distribución de masa suspendida del vehículo sin carrozar. Cotas en mm.	35
Figura 24. Esquema de distribución de la carga. Cotas en mm.	35
Figura 25. Bloque "Trucksim S-Function"	36
Figura 26. Diagrama de variables de salida [].	37
Figura 27. Subsistema de cálculo del coeficiente de transferencia de carga.....	39
Figura 28. Disposición en SIMULINK de las variables de salida utilizadas.....	40
Figura 29. Sistema auxiliar de detección de peralte.....	41
Figura 30. Detector de peralte como subsistema	41
Figura 31. Disposición final en SIMULINK del conjunto de lógica difusa	42
Figura 32. Sistema Pasivo.....	43
Figura 33. Sistema Activo 1	43
Figura 34. Sistema Activo 2	44
Figura 35. Sistema Activo 3	45
Figura 36. Sistema completo	45
Figura 37. Vehículo de ensayo sobre superficie llana y sin obstáculos.....	47
Figura 38. Giro de volante de 180°	48
Figura 39. Giro de volante de 270°	48
Figura 40. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 1	49
Figura 41. Posición del volante en cada instante de tiempo del ensayo 2.	49
Figura 42. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 2	50
Figura 43. Vista aérea del circuito del ensayo 3	51
Figura 44. Curva 1 en el ensayo 3.....	51
Figura 45. Curva 2 en el ensayo 3.....	52
Figura 46. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 3	52
Figura 47. Vista aérea del circuito del ensayo 4	53
Figura 48. Curva 1 del "Circuito en 8".....	53
Figura 49. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 4	54
Figura 50. Trazada del vehículo en el ensayo 5.....	54
Figura 51. Terraplén a los lados de la calzada en el ensayo 5	55
Figura 52. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 5	55
Figura 53. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 1 a 95 km/h.....	57



Figura 54. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 1 a 95 km/h	57
Figura 55. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 1 a 98km/h	58
Figura 56. Vehículo en $t=4s$, Sistema Pasivo, ensayo 1 a 98 km/h.	58
Figura 57. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 2 a 50 km/h.....	59
Figura 58. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 2 a 50 km/h	59
Figura 59. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 3 a 120 km/h.....	60
Figura 60. Vehículo en $t=5s$, Sistema Pasivo, ensayo 3 a 120 km/h	60
Figura 61. Vehículo en $t=7s$, Sistema Pasivo, ensayo 3 a 120 km/h	61
Figura 62. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 3 a 120 km/h	61
Figura 63. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 70 km/h	62
Figura 64. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 70 km/h	62
Figura 65. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 78 km/h	63
Figura 66. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 78 km/h	63
Figura 67. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 5 a 90 km/h.....	64
Figura 68. Vehículo de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16 s$	65
Figura 69. Vehículo en $t=26s$, Sistema Pasivo, ensayo 5 a 90 km/h	65
Figura 70. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 5 a 90 km/h	66
Figura 71. Transferencia de carga. Sistema Activo 1 - Ensayo 1 a 95 km/h	66
Figura 72. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 1 a 95 km/h.....	67
Figura 73. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 1 a 98km/h	67
Figura 74. . Vehículo en $t=5s$, Sistema Activo 1, ensayo 1 a 98 km/h.....	68
Figura 75. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 2 a 50 km/h	68
Figura 76. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 2 a 50 km/h.....	69
Figura 77. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 3 a 120 km/h	69
Figura 78. Vehículo en $t=5s$, Sistema Activo 1, ensayo 3 a 120 km/h.....	70
Figura 79. Vehículo en $t=7s$, Sistema Activo 1, ensayo 3 a 120 km/h.....	70
Figura 80. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 70 km/h	71
Figura 81. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 70 km/h.....	71
Figura 82. . Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 78 km/h	72
Figura 83. Vehículo en $t=5s$, Sistema Activo 1, ensayo 3 a 120 km/h.....	72
Figura 84. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 78 km/h.....	73
Figura 85. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 5 a 90 km/h	73
Figura 86. Vehículo en $t=27 s$, Sistema Activo 1, ensayo 5 a 90 km/h.....	74
Figura 87. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 5 a 90 km/h	74
Figura 88. Vehículos de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16 s$ (2)	75
Figura 89. Diferencia de posición de los vehículos de ensayo en $t=35$	75
Figura 90. Transferencia de carga. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 95 km/h	76
Figura 91. Aceleración lateral. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 95 km/h.....	76
Figura 92. Transferencia de carga. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 98 km/h	77
Figura 93. Aceleración lateral. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 98 km/h.....	77
Figura 94. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 2 a 50 km/h	78
Figura 95. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 2 a 50 km/h.....	78
Figura 96. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 3 a 120 km/h	79
Figura 97. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 70 km/h	79
Figura 98. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 70 km/h.....	80
Figura 99. Vehículo en $t=5s$, Ensayo 4 a 70 km/h	80
Figura 100. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 78 km/h	81
Figura 101. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 78 km/h.....	81
Figura 102. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 5 a 90 km/h.....	82
Figura 103. Diferencia de posición de los vehículos de ensayo en $t=35$ (Conf. 1 – Conf. 2).....	82
Figura 104. Vehículos de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16 s$ (3)	83
Figura 105. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 5 a 90 km/h.....	83
Figura 106. Transferencia de carga. Sistema Activo 3 - Ensayo 1 a 95 km/h	84
Figura 107. Aceleración lateral. Sistema Activo 3 - Ensayo 1 a 95 km/h.....	84
Figura 108. Transferencia de carga. Sistema Activo 3 - Ensayo 1 a 98 km/h	85



Figura 109. Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 2 a 50 km/h.....	85
Figura 110. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 2 a 50 km/h.....	86
Figura 111. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 3 a 120 km/h.....	86
Figura 112. Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 70 km/h.....	87
Figura 113. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 70 km/h.....	87
Figura 114. Vehículo en $t=5s$, Ensayo 4 a 70 km/h (2).....	88
Figura 115 Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 78 km/h.....	88
Figura 116. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 78 km/h.....	89
Figura 117. Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 5 a 90 km/h.....	89
Figura 118 Figura 119. Vehículos de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16 s$ (4)	90
Figura 120. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 5 a 90 km/h.....	90
Figura 121. Mejora en el paso por curva. Sistema Pasivo - Sistema Activo 3.....	92
Figura 122. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 1 - 95km/h.....	92
Figura 123. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 1 - 98 km/h.....	93
Figura 124. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 2 - 50 km/h.....	93
Figura 125. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 3 - 120 km/h.....	93
Figura 126. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 4 - 70 km/h.....	94
Figura 127. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 4 - 78 km/h.....	94
Figura 128. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 5 - 90 km/h.....	94



Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Variables de entrada a los bloques FLC delantero y trasero"</i>	29
<i>Tabla 2. Variables de salida de los bloques FLC delantero y trasero</i>	30
<i>Tabla 3. Colección de reglas para los sistemas de lógica difusa</i>	32
<i>Tabla 4. Motor y transmisión</i>	34
<i>Tabla 5. Dimensiones exteriores</i>	34
<i>Tabla 6. Masa del Vehículo</i>	34
<i>Tabla 7. Características de la suspensión</i>	36
<i>Tabla 8. Características de los neumáticos</i>	36
<i>Tabla 9. Variables de salida</i>	37
<i>Tabla 10. Parámetros de entrada</i>	38
<i>Tabla 11. Parámetros de salida adicionales para el coeficiente de transferencia de carga</i>	39
<i>Tabla 12. Variables de salida para el sistema auxiliar</i>	40
<i>Tabla 13. Comparación de transferencia de carga (CTC)</i>	91



1. Introducción

El vuelco de un vehículo es uno de los accidentes con peores consecuencias para los pasajeros. Aunque se da únicamente en un pequeño porcentaje de este tipo de situaciones, el número de víctimas es, en proporción, mucho más elevado [1].

En vehículos industriales el riesgo de sufrir un vuelco aumenta respecto al que tiene un turismo convencional. Resulta evidente que una furgoneta o camión tiene más probabilidades de volcar debido a sus características de diseño, como puede ser un centro de gravedad más elevado. Sin embargo existen otros factores que influyen en que el número de accidentes en vehículos de este tipo sea superior a la media.

Según datos oficiales de la DGT, en el mes de febrero de 2015, más de 1800 conductores de furgonetas fueron sancionados por exceso de velocidad. Asimismo, se abrieron más de 1000 expedientes por no tener pasada la ITV y más de 400 por exceso de carga [2].

El mal estado de mantenimiento de los vehículos, en su mayoría perteneciente a flotas, y el mal uso que se hace de ellos contribuyen a agravar aún más las estadísticas.

En 2014 el aumento más significativo de la mortalidad en accidentes de tráfico se dio en furgonetas, camiones y vehículos articulados. La cifra pasó de 47 muertos en 2013 a 92 en 2014, lo que supone un importante aumento en un solo año. En 2015 la tendencia es la misma, certificando que en la actualidad se trata de uno de los problemas más graves en las carreteras españolas [3].

1.1. Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es el diseño de un sistema de control antivuelco que permita reducir la transferencia de carga entre las ruedas del vehículo durante su paso por curva.

El sistema de control diseñado está pensado para su incorporación en un vehículo equipado con suspensión activa que cuente con un actuador por cada rueda, ya sea hidráulico, neumático o eléctrico. Estos actuadores serán los encargados de compensar la transferencia de carga, ejerciendo la fuerza necesaria en cada momento. Para determinarla, es necesaria la lectura de distintos parámetros en tiempo real para realizar la toma de decisiones.

El sistema de control antivuelco diseñado tiene, por tanto, la misión de determinar esta fuerza, ejerciendo de nexo entre las lecturas de los sensores y los actuadores del vehículo.

Para poder construir el sistema es necesario modelar un vehículo en el que instalarlo y realizar numerosas simulaciones en distintos entornos para determinar el mejor diseño. Para ello se utiliza el software TruckSim, que permite la simulación dinámica de test de distintos tipos de vehículo [4]. TruckSim permite también la lectura de parámetros como el ángulo de vuelco o la velocidad a la que se produce el mismo, es decir, permite obtener la misma información que se obtendría si se equipa un vehículo real con los sensores adecuados. Esta información se exporta a SIMULINK, que haciendo uso de la lógica difusa, devuelve una señal al vehículo



variable en función de los datos ofrecidos por los sensores. Esta señal contiene la información relativa al funcionamiento de los actuadores en cada instante de tiempo.

1.2. Estructura del proyecto

Este proyecto está dividido en 8 capítulos cuyo contenido se describe a continuación.

En el Capítulo 1, *Introducción*, se describe la situación del panorama actual en lo que a accidentes de vehículos industriales se refiere. Además se realiza esta descripción del contenido del proyecto.

En el Capítulo 2, *Sistemas antivuelco en vehículos industriales*, se muestran los principales sistemas antivuelco que se pueden encontrar en el mercado y que se equipan en vehículos de este tipo.

En el Capítulo 3, *La suspensión como sistema de actuación*, se muestran diferentes sistemas que utilizan la suspensión como elemento actuador. Se trata de dispositivos que no son necesariamente antivuelco, sino que mejoran la estabilidad del vehículo y su paso por curva. El interés de este capítulo recae en conocer los distintos tipos de actuadores con los que se puede equipar un vehículo que utilice el sistema antivuelco descrito en este proyecto.

En el Capítulo 4, *Lógica difusa*, se realiza una introducción teórica a este tema, así como se describen los elementos de lógica difusa que se utilizan en la construcción de este sistema de control antivuelco.

En el Capítulo 5, *Construcción del sistema antivuelco*, se describen paso a paso cada una de las partes que componen el sistema de control, incluyendo el vehículo modelado para las simulaciones y la integración del conjunto de lógica difusa descrito en el Capítulo 4. Además se muestran los diferentes diseños de controlador que se utilizarán en las simulaciones.

En el Capítulo 6, *Tipos de ensayos realizados*, se describen las diferentes simulaciones que se realizarán, analizando tanto las características del trazado como la velocidad de circulación a la que se realiza el ensayo.

En el Capítulo 7, *Resultados de simulación*, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con cada uno de los diseños descritos en el Capítulo 5 (llamados "Sistemas activos"). Estos resultados incluyen información relativa a la transferencia de carga que y la aceleración lateral producida. Finalmente se realiza una comparación general entre los resultados obtenidos.

En el Capítulo 8, *Conclusiones y trabajos futuros*, se recogen los aspectos que han tenido una mayor importancia durante la realización del proyecto, así como una breve introducción a trabajos futuros relacionados con el sistema de control antivuelco.



2. Sistemas antivuelco en vehículos industriales

En el sector de los vehículos industriales existen diversos sistemas que permiten reducir el riesgo de vuelco o que avisan con antelación a que éste se produzca. La gran variedad de productos responde a la problemática a la que este tipo de vehículos se enfrenta. En su mayoría actúan sobre los frenos o sobre el motor y no sobre la suspensión, como en este proyecto.

A continuación se muestran algunos de estos sistemas que se encuentran en el mercado.

2.1. Early warning rollover (EWR)

En los camiones articulados el conductor dispone de mucho menos tiempo para reaccionar ante la posibilidad de vuelco que en un camión rígido. Este comportamiento se debe al centro de gravedad relativamente bajo de la cabeza tractora respecto del que tiene semirremolque. Esta diferencia hace que el conductor sea únicamente consciente del peligro de vuelco cuando la propia cabeza tractora comienza a volcar. En este momento, el semirremolque puede haber alcanzado condiciones críticas. No solo no se puede corregir la situación, sino que cualquier movimiento que se realice, en un intento de compensar el vuelco, puede verse amplificado y afectar negativamente al conjunto.

El “Early warning rollover” avisa al conductor, con antelación, de la posibilidad de vuelco [5]. Se trata, por tanto, de un sistema que no actúa sobre el vehículo, sino que envía una señal luminosa o sonora a la cabina. Para detectar la posibilidad de vuelco es necesaria la instalación de un sensor en el eje trasero que mida la aceleración lateral del semirremolque.

La simplicidad del diseño del “EWR” permite su instalación a posteriori en diferentes modelos de camión articulado. Por otra parte resulta más barato que los sistemas que si que actúan sobre la suspensión o los frenos.

2.2. Trailer Roll Stability (TRS) - Haldex

El sistema TRS está desarrollado por Haldex y permite la monitorización de la aceleración lateral, la velocidad del vehículo, la suspensión y el sistema de aire a presión [6]. El TRS actúa junto con otros sistemas del vehículo, como el ABS, mediante la centralita de control de la Figura 1.

En el momento en el que se detecta la probabilidad de vuelco el sistema permite el accionamiento de los frenos del camión de forma independiente para reducir la velocidad y aumentar la estabilidad.



Figura 1. ECU del sistema TRS

2.3. Roll stability support (RSS)

El Roll stability support (RSS) es un sistema desarrollado por la compañía Wabco que se equipa junto con el sistema ABS de la misma compañía [7]. Se puede utilizar tanto en camiones de pequeño tamaño como en vehículos articulados.

Mediante la monitorización simultánea de la velocidad de las ruedas del semirremolque, aceleración lateral, presión de la suspensión y alargamiento de los muelles se establece el límite de vuelco del vehículo y se puede actuar sobre los frenos. De esta forma se ayuda a mantener el vehículo bajo control.

2.4. Active Rollover Protection (ARP)

Este sistema de protección activa contra vuelco forma parte del equipamiento que disponen los vehículos comerciales de la marca Volkswagen [8]. El ARP actúa junto con el sistema ESP del vehículo.

Los sensores con los que se equipa permiten detectar la posibilidad de que se produzca el vuelco. Entre los parámetros analizados se encuentra la aceleración lateral. Mediante el frenado selectivo de las ruedas se evita el vuelco del vehículo.

3. La suspensión como sistema de actuación

En la actualidad se pueden encontrar numerosos sistemas de suspensión con aplicaciones en vehículos tan diferentes como pueden ser turismos, furgonetas o camiones destinados al transporte de mercancías.

A la hora de diseñar una suspensión hay que tener en cuenta las características del vehículo en el que se va instalar. No es lo mismo diseñar un sistema para un deportivo que para un turismo convencional o furgoneta. En el primer caso, interesa un tarado más duro para un mejor paso por curva y en los demás una mayor adaptabilidad al terreno y comodidad.

Encontrar este equilibrio supone un compromiso entre la capacidad de guiado y transmisión de fuerzas en todas las situaciones dinámicas y permitir una absorción óptima de las irregularidades del terreno, es decir, renunciar al confort. Por ello interesa la capacidad de variar esta dureza dependiendo de las condiciones en las que se circule, el tipo de conducción o la carga del vehículo.

En este punto se abre un abanico de posibilidades para sustituir la suspensión pasiva tradicional. En el mercado se encuentran distintos tipos de suspensiones activas y semiactivas que permiten llevar a cabo esta variación del tarado [9].

Este proyecto pretende el diseño de un sistema de control antivuelco utilizando la suspensión como medio de actuación. Por ello es necesario conocer las diferentes posibilidades que se ofrecen en la actualidad, así como los sistemas que las utilizan.

3.1. Suspensión semiactiva

Una suspensión semiactiva tiene una configuración similar a la de una suspensión pasiva. La principal diferencia se encuentra en la sustitución de los amortiguadores por unos modulables en función de las condiciones. Por otra parte es necesaria la instalación de sensores y sistemas eléctricos (controlador) que permitan hacer uso de esta capacidad de adaptabilidad.

En la Figura 2 se muestra la similitud entre un sistema convencional. El controlador actúa sobre el amortiguador de forma que varíe el coeficiente de amortiguamiento.

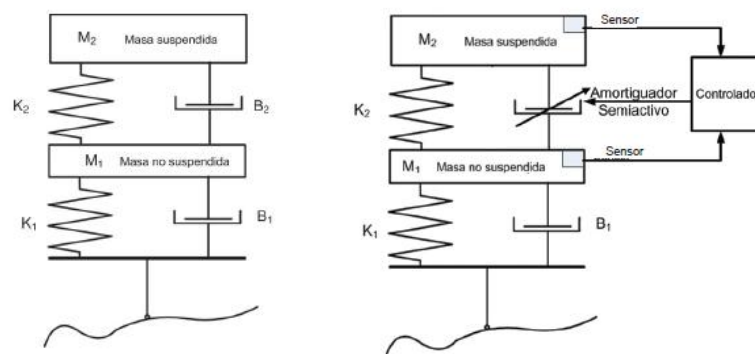


Figura 2. Esquema de suspensión convencional frente a una suspensión semiactiva

Cuando se evalúa el comportamiento del amortiguador en una suspensión convencional y se representa la fuerza en función de la velocidad se obtiene una curva de como la que se muestra en la Figura 3. Como se puede observar en esta figura el rango de funcionamiento se encuentra únicamente en los cuadrantes positivos, en los que la velocidad tiene el mismo signo que la fuerza.

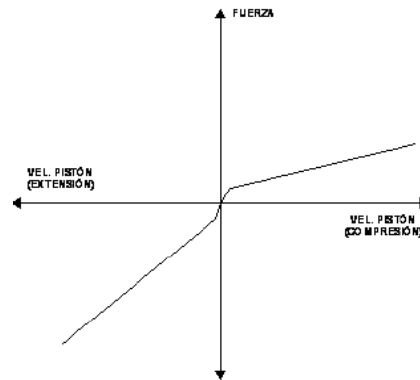


Figura 3. Representación Fuerza – Velocidad en un amortiguador convencional

Una suspensión semiactiva, al no tener un aporte externo de energía, permite únicamente variar la fuerza del amortiguador dentro de los cuadrantes positivos.

Entre los diferentes tipos de amortiguadores que pueden utilizarse en una suspensión semiactiva destacan los amortiguadores magnetoreológicos y los electroreológicos.

3.1.1. Amortiguadores magnetoreológicos

Este tipo de amortiguadores permiten cambiar sus propiedades mediante la estimulación eléctrica. Este efecto, que se explica a continuación, permite la variación del comportamiento del vehículo.

Este tipo de amortiguadores tienen en su interior un fluido con propiedades magnéticas y un bobinado a su alrededor. Estos líquidos están formados por un fluido portador (generalmente aceite mineral) y partículas magnetizables muy finas y suspendidas en él, de un orden de magnitud entre 0.05 y 0.8 micrones [10].

Los fluidos magnéticos responden ante la presencia de un campo de este tipo mediante la reorganización de las partículas suspendidas en él. Esta respuesta varía en función de la intensidad del campo al que son expuestos, lo que permite una reacción rápida y precisa perfecta para la aplicación en una suspensión de dureza variable [10].

Cuando la corriente eléctrica pasa por la bobina se genera un campo magnético que produce la polarización de las partículas. La interacción entre los dipolos inducidos resultantes obliga a la

reorganización en estructuras columnares que dificultan el movimiento del fluido (ver Figura 4). Esta restricción produce un cambio en sus características viscosas, lo que se traduce en una variación de la dureza del amortiguador [10].

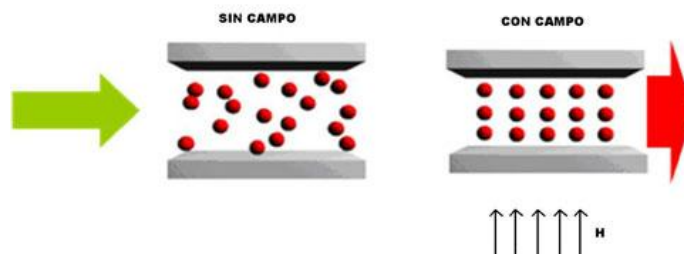


Figura 4. Representación de la reorganización de las partículas magnéticas [11]

La aplicación de estos sistemas no se limita únicamente a su uso en suspensiones de vehículos. La propiedad magnetoreológica de los fluidos es muy útil para la absorción de vibraciones, la amortiguación en asientos de maquinaria pesada o para el control de vibraciones sísmicas en estructuras [10].

3.1.2. Amortiguadores electroreológicos

Este tipo de amortiguadores presenta algunas diferencias respecto a los magnetoreológicos.

A diferencia de los anteriores, no se utiliza un campo magnético para cambiar la viscosidad del fluido, sino que se hace atravesar una corriente eléctrica través del mismo [12]. El uso de estos sistemas está claramente menos extendido que el de los sistemas magnéticos debido a la necesidad de una tensión eléctrica mayor y a su mayor susceptibilidad a la contaminación.

3.1.3. Dynamic ESA

Un ejemplo concreto de aplicación de la suspensión semiactiva se encuentra en motocicletas de la marca BMW, bajo la denominación de “Dynamic ESA”.

Mediante un conjunto de sensores se obtiene una lectura del movimiento vertical de las ruedas delantera y trasera, así como de su velocidad. El sistema es capaz de variar las condiciones del amortiguador electrónicamente adaptando la suspensión a la situación [13].

3.2. Suspensión Activa

Un sistema de suspensión activa es más complejo que los anteriores desarrollados. Como se muestra en la Figura 5 se cuenta con un actuador cuyo accionamiento está regulado a través de un controlador en función de la información recabada por sensores situados en el vehículo. Estos sistemas tienen como objetivo mantener la carrocería en posición horizontal. Para ello es necesario realizar un aporte de energía en el conjunto de la suspensión.

Los sensores aportan información acerca del comportamiento del vehículo, perturbaciones y otros parámetros que necesita el controlador para regular el funcionamiento del actuador.

Existen numerosos tipos de actuadores que permiten realizar este aporte de energía. Entre ellos destacan los actuadores electro-hidráulicos, los neumáticos y los electromagnéticos. Sin embargo la operación incorrecta de alguno de estos sensores puede conducir a un comportamiento no deseado de la suspensión con consecuencias más graves que en el caso de un sistema semiactivo.

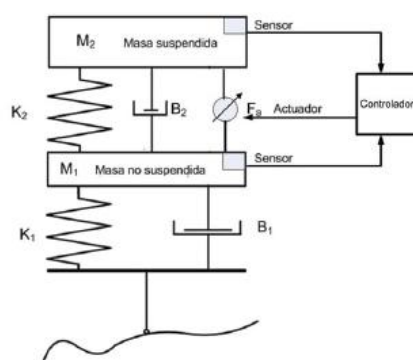


Figura 5. Esquema de configuración de una suspensión activa

3.2.1. Actuadores neumáticos e hidráulicos

Los actuadores neumáticos utilizan la energía del aire comprimido para producir movimiento. Se pueden encontrar numerosos tipos de actuadores, desde balones neumáticos hinchables hasta mecanismos provistos de cilindros.

Este tipo de actuadores ha sido utilizado de forma generalizada en vehículos con altura regulable, tanto todoterrenos como utilitarios. El sistema proporciona aire comprimido a una serie de balones hinchables que hacen que la altura de la carrocería pueda cambiar la posición en función del terreno o las condiciones que se dan en cada momento.

Los actuadores hidráulicos tienen un funcionamiento similar a los neumáticos, con la diferencia de utilizar un fluido líquido (generalmente aceite mineral) que es el encargado de transmitir la fuerza.

Se trata de sistemas más precisos que permiten fuerzas mayores y en menor tiempo, pero que tienen la desventaja de ser más caros y complejos.

3.2.2. Suspensión Hidroneumática

Se trata de una tecnología desarrollada por Citroën a mediados del siglo XX.

Estos sistemas nacieron de la necesidad de diseñar un vehículo capaz de proporcionar un elevado grado de confort en las carreteras francesas durante los años de posguerra. Mediante la suspensión hidroneumática se conseguía una conducción más cómoda y alcanzar mayores velocidades en este entorno [14].

Componentes básicos de la suspensión hidroneumática

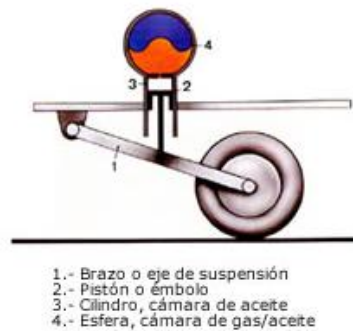


Figura 6. Esquema de una suspensión hidroneumática.

Este tipo de suspensión utiliza nitrógeno y aceite al mismo tiempo. El nitrógeno, representado en azul en la Figura 6, se comprime debido a la presión que ejerce sobre él el fluido hidráulico (presurizado por una bomba accionada por el propio motor del coche). Este fluido presurizado también puede ser utilizado para hacer funcionar los frenos, la dirección asistida o el embrague [13].

La complejidad de esta estructura hacía fácil que se produjese un fallo que dejase el vehículo sin muchos de los sistemas más importantes que lo componen.

Citroën introdujo por primera vez esta tecnología en la suspensión trasera del Traction avant en 1954 y se instaló de forma completa un año más tarde en el Citroën DS (ver Figura 7) [15].



Figura 7. Citroën DS de 1954 en posición elevada y con el motor apagado respectivamente

3.2.3. Active Body Control (ABC) - Mercedes Benz

Mercedes Benz ha desarrollado una suspensión activa completamente hidráulica [16]. El vehículo que la equipa está dotado de un sistema de pistón hidráulico que actúa directamente sobre los muelles. De esta forma se ajusta la suspensión de cada rueda. Un conjunto de 13 sensores permite monitorizar el movimiento y la altura del coche y proporcionan toda la información necesaria al sistema ABC.

De forma casi instantánea, los actuadores generan fuerzas para contrarrestar el balanceo del coche durante el paso por curva y además permiten la regulación automática de la altura dependiendo de la velocidad de circulación (ver Figura 8).

Sin embargo, el ABC tiene otra peculiaridad. Mediante una cámara con varias lentes es capaz de hacer una lectura del pavimento.

Esta función, añadida en 2007 al sistema ABC original, permite anticipar el comportamiento de la suspensión a las irregularidades que se encuentren. Se trata de un concepto radicalmente opuesto a de una suspensión convencional, dado que en una suspensión pasiva el amortiguador actúa después de que la rueda haya alcanzado el obstáculo. El resultado es que los ocupantes del vehículo apenas pueden distinguir estas irregularidades ya que son prácticamente neutralizadas.



Figura 8. Mercedes Clase S equipado con un prototipo del sistema ABC

3.2.4. DRC Audi

El sistema desarrollado por Audi utiliza amortiguadores conectados entre sí que permiten contrarrestar los movimientos de cabeceo en frenada y de vuelco en curva, sin utilizar ningún tipo de control electrónico [17], [18]. Para ello, un circuito hidráulico une los amortiguadores opuestos diagonalmente. En el punto central, una válvula regula el paso de fluido presurizado entre la parte delantera y trasera (ver Figura 9).

La principal ventaja es que no utiliza complejos sistemas electrónicos, difíciles de reparar, sino que es totalmente mecánico.

El “Dynamic ride control” se incluye en la actualidad en las versiones deportivas de algunos de los modelos más conocidos, como el RS6 y RS7. Sin embargo pérdidas de presión en el circuito diagonal han hecho que numeras unidades hayan sido llamadas para revisión oficial.

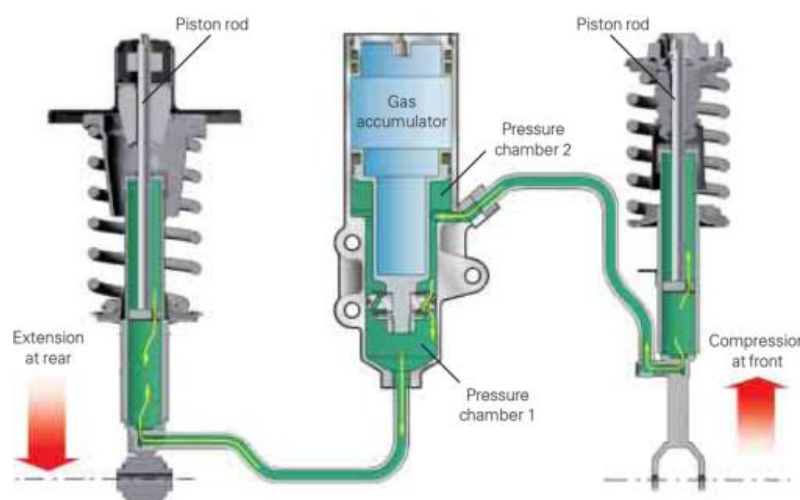


Figura 9. Esquema del circuito hidráulico diagonal.

3.2.5. Suspensión activa “Bose”

Después de una investigación de 5 años que comenzó en 1980, la empresa BOSE (más conocida por la comercialización de equipos de audio) comenzó el desarrollo de un proyecto con el objetivo de optimizar el funcionamiento de la suspensión de un vehículo [19]. El resultado es un sistema basado en motores electromagnéticos lineales que se colocan en sustitución de los elementos de amortiguación convencionales.

Cuando se aplica una corriente eléctrica a estos motores, se produce un movimiento vertical que permite contrarrestar el balanceo de la carrocería en el paso por curva (ver Figura 10). El hecho de sea un motor electromagnético hace que la respuesta sea más rápida que si utilizásemos uno de otro tipo.



Figura 10. Comparativa entre un vehículo sin sistema de suspensión activa BOSE y uno equipado con él

Por otra parte es necesaria la colocación de un sistema de control que regule el funcionamiento de los motores, mediante la instalación de diferentes tipos de sensores y un amplificador eléctrico que proporcione un suministro eléctrico suficiente a los actuadores.

El prototipo está diseñado de forma genérica, en forma de modulo completo, pensado en su implantación en diferentes vehículos como mejora (ver Figura 11). Según la compañía, su diseño modular permitiría esta práctica sustituyendo el conjunto de suspensión convencional del vehículo utilizando los anclajes originales.



Figura 11. Modulo delantero de suspensión activa BOSE

4. Lógica difusa

La lógica difusa es una metodología que permite la toma de decisiones en función de unos parámetros que proporcionan una información. Sin embargo lo característico de esta información es que es de carácter impreciso, sin valores concretos.

Carlos Eduardo D’Negri y Eduardo Luis de Vito definen este método en su artículo “Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa” como una imitación de la estrategia de toma de decisiones de una persona.

La lógica difusa se diferencia de la convencional en que es capaz de trabajar con valores intermedios. Por ejemplo, la lógica convencional podría distinguir entre blanco o negro, pero no sería capaz de detectar gris oscuro o gris claro. Se trata por tanto de una lógica multievaluada.

Este concepto fue desarrollado por el profesor de la Universidad de Berkeley Lofti A. Zaded, según el cual la pertenencia de un elemento a un conjunto puede tener carácter parcial y entrega un valor de entre 0 y 1. Es decir, para el ejemplo anterior el gris oscuro pertenecería al conjunto “Blanco” con una ponderación de 0,25 y al “Oscuro” con una ponderación de 0,75, como se muestra en la Figura 12.

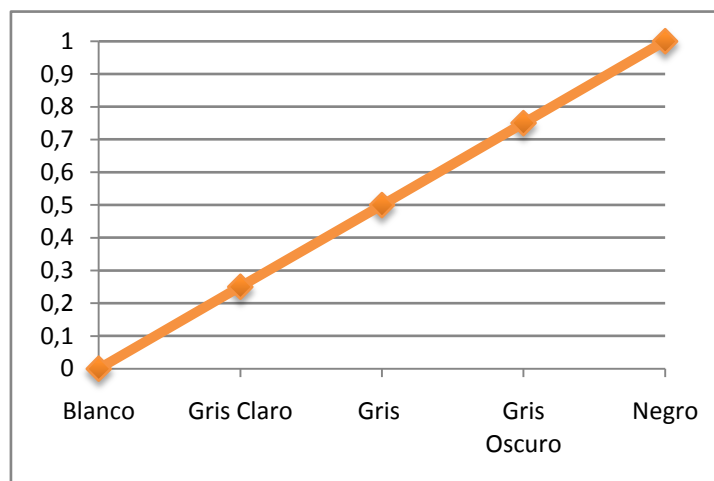


Figura 12. Ponderación Blanco - Negro

La utilidad de esta metodología viene dada por el carácter impreciso de la información que se puede obtener de la realidad. Este carácter impreciso se debe, según D’Negri y de Vito, a tres causas principales.

Por una parte, es muy común que la información obtenida sea incompleta o sea en parte errónea. En segundo lugar, las características propias del mundo real hacen que en muchas ocasiones no sea posible acceder a una información precisa. Finalmente, los modelos que se utilizan para explicar los mecanismos que lo rigen son también una fuente de incertidumbre, dado el error que cometen.

4.1. Funciones de inclusión de conjuntos difusos

En el ejemplo de la Figura 12 resulta sencillo determinar el grado de pertenencia a los conjuntos “blanco o negro”, pero no resulta igual de simple en todos los casos. Por este motivo es necesario definir las “funciones de inclusión” o pertenencia.

Este tipo de funciones, que pueden ser continuas o discretas en función del tipo de datos analizado, permiten asignar un determinado grado de pertenencia.

Para la definición de estas funciones se utilizan convencionalmente ciertas familias de funciones estándar. Las más habituales son la función de tipo trapezoidal, singleton, S exponencial, tipo π y triangular, siendo esta última la utilizada en este proyecto y que se explica a continuación [20].

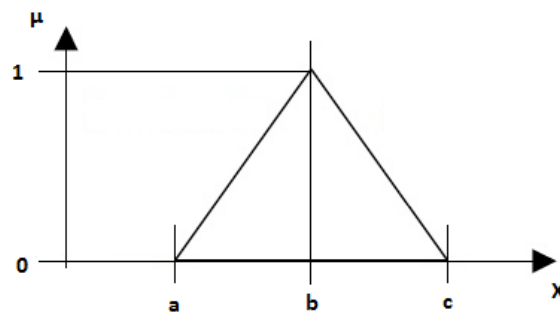


Figura 13. Ejemplo de función de pertenencia triangular

En la Figura 13 se muestra una función genérica triangular. μ representa el grado de pertenencia a un determinado conjunto de un valor x que se encuentra en el dominio de esa función, es decir, entre a y b .

Esta función puede definirse como:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{si } x > c \end{cases} \quad (1)$$

Donde x , a , b y c son los parámetros que se definen en la Figura 13.

4.1.1. Particiones difusas

Se define “partición difusa” como cada una de las distintas funciones de inclusión que se han utilizado para describir el dominio de una determinada variable x [20]. Estas particiones pueden superponerse unas con otras para cubrir por completo el dominio de valores que puede adoptar x , como se puede observar en la Figura 14.

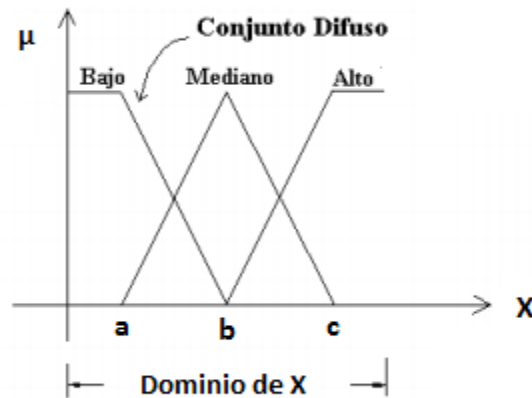


Figura 14. Particiones difusas

En esta figura se muestran 3 conjuntos difusos que cubren el dominio de x . A cada uno de ellos se le asigna un valor lingüístico, en este caso Bajo, Mediano y Alto, con el que referirse a él.

4.1.2. Reglas difusas

Una vez definidas las particiones difusas es necesario, para permitir la toma de decisiones utilizando esta metodología, establecer una serie de “reglas difusas”.

Las reglas difusas permiten la relación entre uno o más conjuntos de entrada (antecedentes o premisas) con uno de salida (consecuente o consecuencia).

Este conjunto de reglas permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación que existe entre antecedentes y consecuentes. El conjunto de reglas utilizado se denomina “base de reglas”.

Estas reglas son del tipo “if – then” y utilizan los valores lingüísticos asociados a cada conjunto [20].

4.2. Sistemas de control difuso

Una de las principales utilidades de la lógica difusa es el desarrollo de sistemas de control basados en ella.

Los sistemas de control difusos o FLC (Fuzzy Logic Controller), como el que se muestra en la Figura 15, cuentan en primer lugar con una serie de variables de entrada y una o más salidas (también conocidas como actuadores).

Las variables de entrada llegan en forma de vector al bloque borrosificador. Éste realiza la conversión de los valores de entrada a términos difusos, es decir, aplica la función de inclusión correspondiente. La salida es utilizada por el dispositivo de inferencia borrosa, que aplica las reglas definidas, y proporciona una salida difusa. Por último, el desborrosificador permite la conversión de la señal difusa en una señal discreta (o continua) con la que se puede realizar el control de proceso [20]

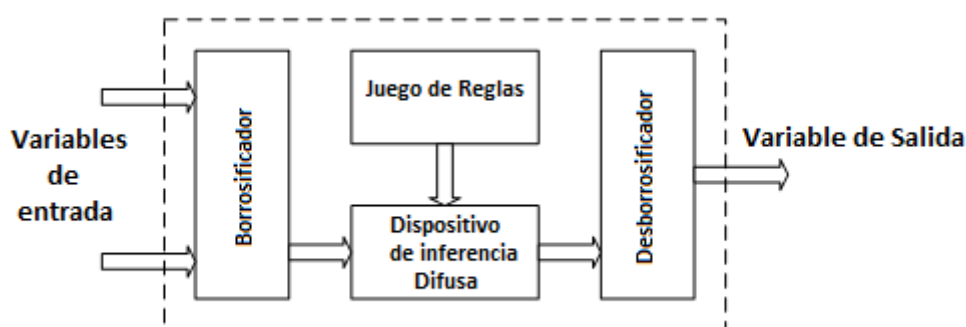


Figura 15. Dispositivo de control FLC

Existen distintos tipos de desborrosificación [20]:

- Desborrosificador por máximo. Proporciona el valor del primer punto que tenga el grado de pertenencia más alto
- Desborrosificador por centro de gravedad. Proporciona el valor correspondiente al centro de gravedad de la superposición de las áreas de los conjuntos, siendo éste el método que se utilizará en el desarrollo del sistema de este proyecto.
- Desborrosificador de centro de sumas. En vez de hallar el centro de gravedad de la unión de todas las áreas, se calcula el valor para cada una de ellas y a continuación se realiza una media ponderada.
- Desborrosificador por centro de área mayor. Se utiliza en el caso de tener conjuntos que no están unidos, es decir, que existen espacios no definidos entre ellos. Se aplicará por tanto en el conjunto que tenga un área mayor.

4.3. Lógica difusa en el entorno Matlab / SIMULINK

Matlab es probablemente uno de los entornos de desarrollo matemático más utilizado para aplicaciones de control y procesamiento de señal [20].

Este entorno puede considerarse una especie de sistema interactivo cuyos elementos básicos son matrices, las cuales se dimensionan dinámicamente. La solución de los problemas se puede expresar en Matlab mediante expresiones matemáticas similares a las convencionales.

Matlab cuenta con una amplia librería de funciones matemáticas y operaciones aritméticas, operadores lógicos, herramientas de análisis de datos, calculo polinómico y análisis de sistemas no lineales.

Este software permite su utilización de forma interactiva basándose en la definición de variables globales, siempre en forma de matrices, y operaciones entre ellas, cuyo resultado se almacena en otras matrices. Se dispone de muchas funciones que permiten realizar estas operaciones, pero una de las características más importantes de Matlab es que pueden definirse nuevas funciones como secuencias de comandos ya definidos, almacenándolos en un fichero del tipo M-Files. Existen amplias colecciones de estos M-files (o toolboxes) que han sido escritas para aplicaciones especiales, como puede ser la Fuzzy logic toolbox que se utiliza en este proyecto. Esta aplicación permite el trabajo con lógica difusa con relativa sencillez y buenas salidas gráficas (ver Figura 16).

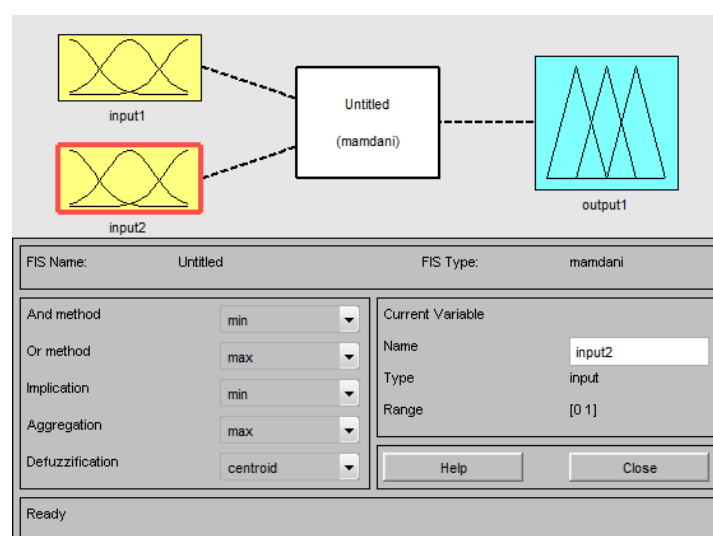


Figura 16. Fuzzy logic toolbox

Como complemento a MATLAB se dispone de SIMULINK, que es un entorno gráfico orientado a la simulación de sistemas dinámicos no lineales [20]. Para modelar los sistemas, SIMULINK cuenta con diferentes bloques lineales y no lineales, tanto en el campo continuo como en el discreto. Los sistemas se describen como bloques que se conectan entre sí organizados jerárquicamente. En la Figura 17 se muestra un ejemplo de control de nivel de agua de un tanque realizado con SIMULINK. En el centro de la imagen se encuentra un bloque del tipo FLC (Fuzzy Logic Controller), que permite la integración de la fuzzy logic toolbox en SIMULINK.

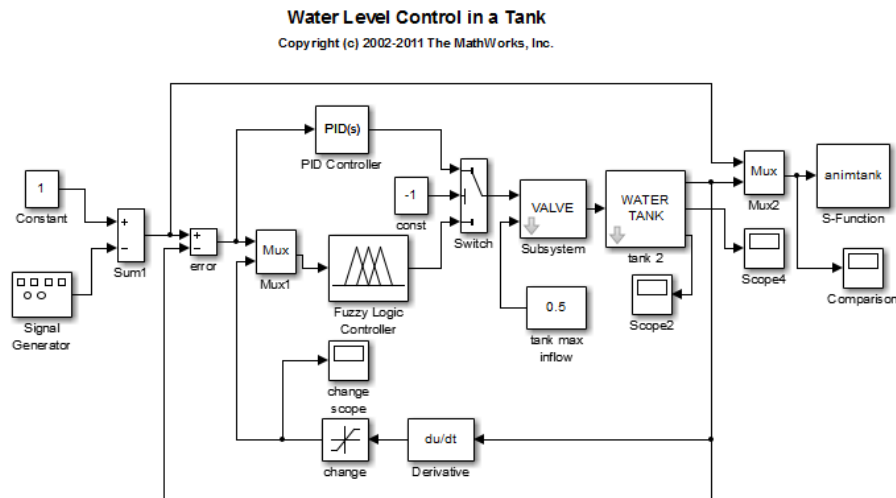


Figura 17. Ejemplo de sistema de control en SIMULINK [21]

Para el análisis de sistemas se pueden utilizar distintos algoritmos de resolución de ecuaciones diferenciales. Además permite la extracción de modelos lineales en torno a un punto de operación del sistema no lineal y posee herramientas para la determinación de los puntos de equilibrio.

La combinación de estas herramientas resulta muy útil en el proceso de diseño de un sistema complejo ya que permiten analizar de forma fácil distintas soluciones, aunque en ocasiones la gran carga computacional requerida puede plantear problemas.

Otra de las aplicaciones de estas toolboxes es la posibilidad de conversión de los sistemas descritos en forma de M-Files o ficheros de SIMULINK a sistemas autónomos basados en procesadores de tipo 486 o superiores [20].

4.4. Diseño del sistema de control antivuelco

La aplicación de la lógica difusa en este sistema de control antivuelco permite evaluar de forma sencilla la señal que proviene de los sensores del vehículo.

Tras la realización de diferentes ensayos y simulaciones, la configuración final consta de dos bloques distintos de lógica difusa (FLC) en SIMULINK, uno para el eje delantero y otro para el trasero. De esta forma se puede modificar el funcionamiento del sistema de forma independiente en cada uno de los dos ejes.

Cuando un vehículo se acerca al instante de vuelco, es el eje trasero el primero que sufre un levantamiento de una de las ruedas. Gracias a que se cuenta con dos bloques distintos se puede determinar una mayor actuación en este eje con el fin de compensar el conjunto.

4.4.1. Variables de entrada al los bloques FLC

Las variables de entrada que se utilizan en cada uno de los bloques FLC de SIMULINK son las señales portadoras de la información referida al ángulo de vuelco del vehículo y la velocidad a la que se produce.

Los valores que se analizan pueden tomar valores tanto positivos como negativos, dependiendo del sentido en el que se produzca el vuelco. En la Tabla 1 en la Figura 18 y en la Figura 19 se muestran las funciones de inclusión utilizadas, así como los valores característicos de las mismas.

Tabla 1. Variables de entrada a los bloques FLC delantero y trasero"

Eje	Parámetro	NBig	NMed	Norm	PMed	PBig
Delantero	Ángulo de vuelco (grad)	$(-7, -3'5)$	$(-7, 0)$	$(-3'5, 3'5)$	$(0, 7)$	$(3'5, 7)$
	Velocidad de vuelco (grad/s)	$(-15, -7'5)$	$(-15, 0)$	$(-7'5, 7'5)$	$(0, 15)$	$(7'5, 15)$
Trasero	Ángulo de vuelco (grad)	$(-7, -3'5)$	$(-7, 0)$	$(-3'5, 3'5)$	$(0, 7)$	$(3'5, 7)$
	Velocidad de vuelco (grad/s)	$(-15, -7'5)$	$(-15, 0)$	$(-7'5, 7'5)$	$(0, 15)$	$(7'5, 15)$

Los valores lingüísticos utilizados son los siguientes:

- NBig y PBig engloban aquellos valores considerados “grandes” en el conjunto negativo y positivo respectivamente.
- NMed y PMed engloban el rango de valores considerado como “medios” en el conjunto negativo y positivo respectivamente.
- “Norm” es un valor intermedio, cuyo rango está centrado en el valor 0.

Cada uno de los valores lingüísticos mencionados se corresponde con cada una de las funciones que se muestran en la Figura 18 y en la Figura 19 del tipo triangular (ver sección 4.1).

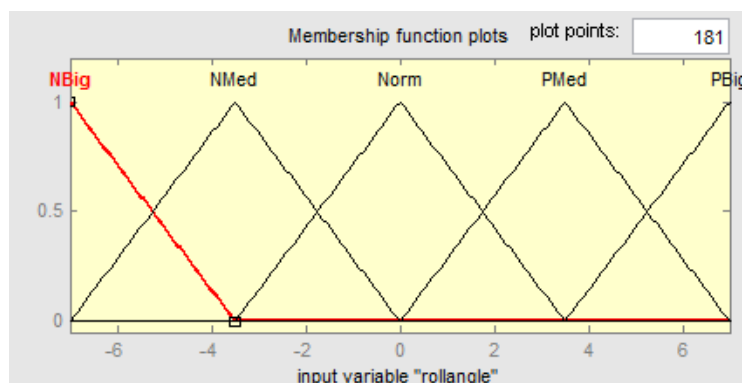


Figura 18. Funciones utilizadas para el ángulo de vuelco

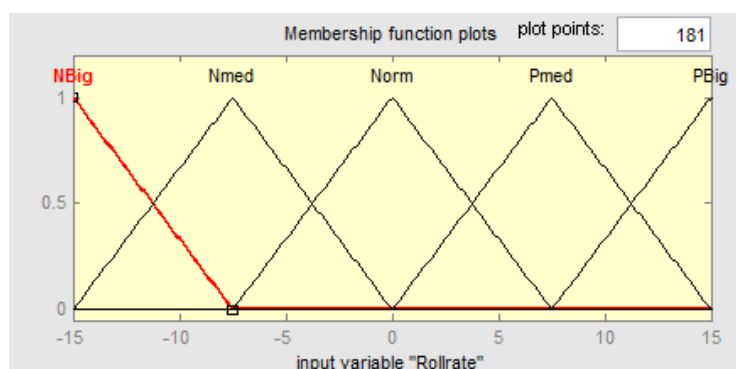


Figura 19. Funciones utilizadas para la velocidad de vuelco

4.4.2. Valores de salida de los bloques FLC

Estos valores son aquellos que determinan la fuerza que los actuadores deben ejercer en cada instante de tiempo. El rango de valores está normalizado, es decir, entre ± 1 . Por ello es necesario añadir un factor de multiplicación externo al bloque "Fuzzy Logic Controller". Éste se puede utilizar para realizar simulaciones con diferentes grados de actuación por parte del sistema. Además permite definir las características de estas señales de forma idéntica para el eje delantero y trasero, reduciendo la complejidad del sistema.

Los valores lingüísticos utilizados para cada parámetro de salida son los mismos utilizados para los parámetros de entrada. En este caso, los valores positivos indican que la fuerza que se debe ejercer es hacia arriba y los negativos hacia abajo. En la Tabla 2, en la Figura 20 y en la Figura 31 se muestran las funciones de inclusión utilizadas, así como los valores característicos de las mismas.

Tabla 2. Variables de salida de los bloques FLC delantero y trasero

Eje	Parámetro	NBig	NMed	Norm	PMed	PBig
Delantero	Fuerza Am. Izquierdo	$(-1, 0.5)$	$(-1, 0)$	$(-0.5, 0.5)$	$(0, 1)$	$(0.5, 1)$
	Fuerza Am. Derecho	$(-1, 0.5)$	$(-1, 0)$	$(-0.5, 0.5)$	$(0, 1)$	$(0.5, 1)$
Trasero	Fuerza Am. Izquierdo	$(-1, 0.5)$	$(-1, 0)$	$(-0.5, 0.5)$	$(0, 1)$	$(0.5, 1)$
	Fuerza Am. Derecho	$(-1, 0.5)$	$(-1, 0)$	$(-0.5, 0.5)$	$(0, 1)$	$(0.5, 1)$

En la Figura 20 se muestran las funciones de inclusión correspondientes a cada conjunto para el caso de un actuador derecho, ya sea delantero o trasero.

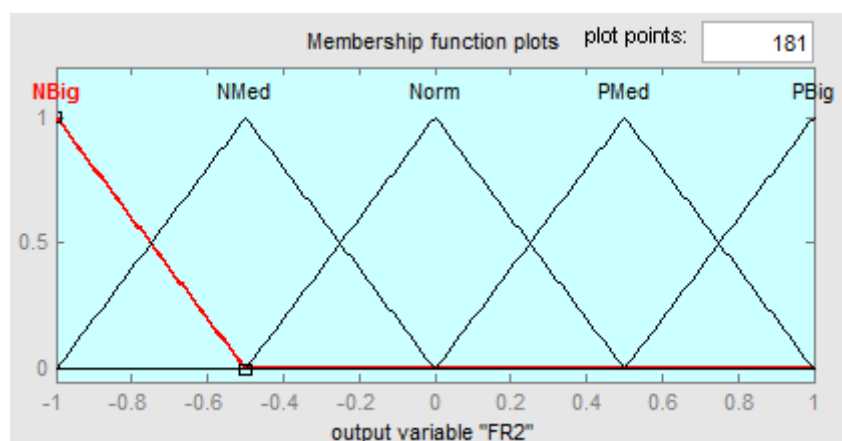


Figura 20. Configuración de funciones para los parámetros de salida (actuador derecho)

En la Figura 21 se muestran las funciones de inclusión correspondientes a cada conjunto para el caso de un actuador izquierdo, ya sea delantero o trasero.

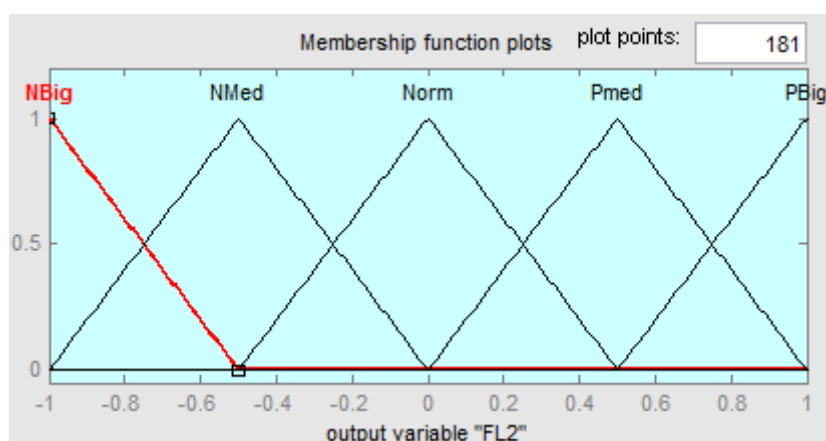


Figura 21. Configuración de funciones para los parámetros de salida (actuador izquierdo)

4.4.3. Juego de reglas utilizado

Para el funcionamiento del sistema, es necesario definir un juego de normas que permita la toma de decisiones en función de los parámetros de entrada.

El criterio que se ha utilizado es considerar que, cuando el vehículo toma una curva, los actuadores en el lado exterior deben realizar una fuerza positiva y los del interior una fuerza negativa. De esta manera se puede controlar el balanceo del camión y por tanto reducir la transferencia de carga.

Sin embargo, este criterio no es siempre válido. Por ello es necesario incluir un sistema auxiliar que permita cambiarlo, el cual se muestra en la sección 5.4.



En total se han introducido 25 reglas que describen todas las combinaciones posibles de parámetros de entrada. Estas normas se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Colección de reglas para los sistemas de lógica difusa

Nº de Regla	Ángulo de vuelco	Velocidad de vuelco	Fuerza Am. Izquierdo	Fuerza Am. Derecho
1	NBig	NBig	PBig	NBig
2	NBig	NMed	PBig	NBig
3	NBig	Norm	PBig	NBig
4	NBig	PMed	PMed	NMed
5	NBig	NBig	PMed	NMed
6	NBig	NBig	PBig	NBig
7	NMed	NMed	PMed	NMed
8	NMed	Norm	PMed	NMed
9	NMed	PMed	PMed	NMed
10	NMed	NBig	PMed	NMed
11	Norm	NBig	PBig	NBig
12	Norm	NMed	PMed	NMed
13	Norm	Norm	Norm	Norm
14	Norm	PMed	NMed	PMed
15	Norm	NBig	NBig	PBig
16	PMed	NBig	NMed	PMed
17	PMed	NMed	NMed	PMed
18	PMed	Norm	NMed	PMed
19	PMed	PMed	NMed	PMed
20	PMed	NBig	NBig	PBig
21	PMed	NBig	NMed	PMed
22	PBig	NMed	NMed	PMed
23	PBig	Norm	NBig	PBig
24	PBig	PMed	NBig	PBig
25	PBig	NBig	NBig	PBig

5. Construcción del sistema antivuelco

El sistema de control antivuelco diseñado en este proyecto se construye utilizando el entorno Matlab – SIMULINK. Este software permite integrar los resultados obtenidos de TruckSim y la aplicación de la lógica difusa.

TruckSim cuenta con multitud de ensayos que se han utilizado para comprobar la efectividad del sistema. El software permite, por otra parte visualizar en forma de gráficos la información en cada instante de la simulación.

SIMULINK se utilizará para procesar la información que sirve como valores de entrada en los bloques de control difuso (ver sección 4.4.1).

5.1. Características del vehículo modelado

El sistema de control antivuelco realizado en este proyecto se aplica a un vehículo modelado en el software TruckSim. Se trata de un camión con las características predeterminadas por el programa que se utilizará en las diferentes simulaciones que han permitido el desarrollo del controlador utilizando lógica difusa (ver Figura 22).

La actuación del controlador se modela como una variación en la fuerza en el amortiguador, de forma que se produce el mismo efecto que si se incluye un actuador que realiza una fuerza en cada una de las ruedas.

En las siguientes páginas se recogen, en forma de tablas, las características del vehículo de serie, sin considerar las modificaciones que serían necesarias en el caso de llevar a cabo la instalación del sistema antivuelco.

En la Tabla 4 se muestran las características del motor y la transmisión del vehículo modelado y en la Tabla 5 las dimensiones exteriores del mismo.



Figura 22. Imagen del camión modelado para los ensayos

Tabla 4. Motor y transmisión

Motor y transmisión	
Potencia	238 Cv (175 kw) a 3000rpm
Par máximo	704,6 Nm a 1750 rpm
Caja de cambios:	
Tipo	Automática 7 velocidades
Relaciones de transmisión :	
1	7,59:1
2	5,06:1
3	3,38:1
4	2,25:1
5	1,5:1
6	1,0:1
7	0,75:1
Tracción	Trasera
Diferencial trasero	Abierto, i=5:1

Tabla 5. Dimensiones exteriores

Dimensiones	
Alto	3,2 m
Ancho total	2,438 m
Área frontal	10m ²
Coeficiente aerodinámico	0,64
Ancho de vía delantero	2,03m
Ancho de vía trasero	1,863m
Distancia entre ejes	5m

Tabla 6. Masa del Vehículo

Masa del vehículo	
Masa suspendida (Sin caja)	4457 kg
Altura del CDG	1,173 m
Carga transportada	6789 kg
Altura CDG de la carga	1,8 m
Masa total (en vacío)	12550 kg

En la Tabla 6 se muestra la información relativa a la masa del vehículo. Se muestran por separado, la masa suspendida y la masa de la carga transportada, que se considera solidariamente unida a la masa suspendida. El motivo para hacer esta separación es que los vehículos de este tipo están disponibles para múltiples configuraciones, de forma que un carrocerero externo pueda personalizar el vehículo.

En la Figura 21 se muestra la ubicación del centro de gravedad del vehículo sin carrozar junto a otros parámetros, y en la Figura 24 se muestra la ubicación del centro de gravedad de la carga.

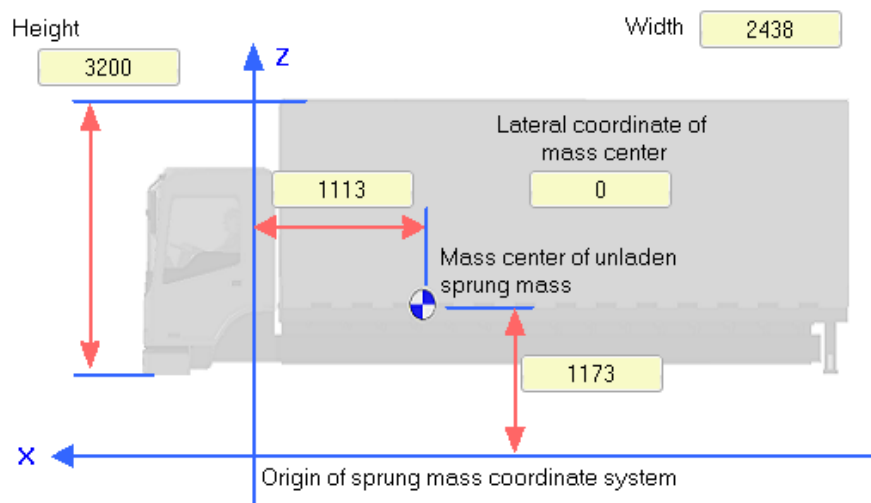


Figura 23. Esquema de distribución de masa suspendida del vehículo sin carrozar. Cotas en mm.

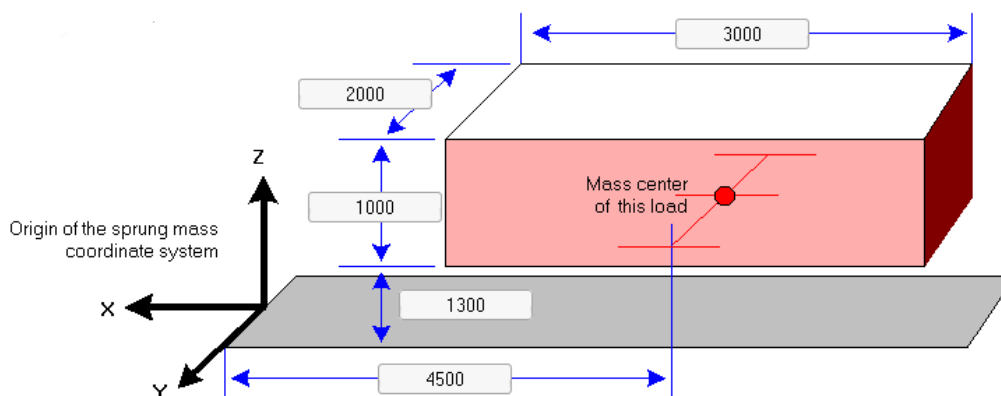


Figura 24. Esquema de distribución de la carga. Cotas en mm.

En la Tabla 7 aparecen resumidas las características principales relacionadas con el sistema de suspensión del vehículo y en la Tabla 8 los datos relativos a los neumáticos.

Tabla 7. Características de la suspensión

Suspensión	
Delantera:	
Eje rígido	
Masa no suspendida	570 kg
Amortiguadores	Cte. amortiguación 15 kN-s/m
Muelles	Cte. de compresión 250 N/mm
Trasera:	
Eje rígido	
Masa no suspendida	735 kg
Amortiguadores	Cte. amortiguación 30 kN-s/m
Muelles	Cte. de compresión 700 N/mm

Tabla 8. Características de los neumáticos

Neumáticos	
Delanteros:	305/75R22.5
Rueda sencilla	
Rigidez	980 N/mm
Carga máxima	1000000 N
Traseros:	305/75R22.5
Ruedas gemelas	Separación 310mm
Rigidez	980 N/mm
Carga máxima	1000000 N

5.2. Bloque "TruckSim S-Function"

Para poder utilizar los datos relativos al vehículo en el entorno de SIMULINK es necesario utilizar el bloque "TruckSim S-Function" (Figura 25). Este bloque permite importar desde TruckSim la información relacionada con multitud de parámetros del vehículo (parámetros de salida) y además, permite también la modificación de los parámetros del mismo durante una simulación (parámetros de entrada).

El código de vehículo, S_S, indica la configuración del mismo. En este caso indica que el camión cuenta con eje rígido tanto en la parte delantera como en la trasera.



Figura 25. Bloque "TruckSim S-Function"

5.2.1. Parámetros de salida

En primer lugar, es necesario definir aquellas variables que tienen que ser exportadas a SIMULINK. Se trata de las fuentes de información a partir de las cuales el controlador puede tomar las decisiones, es decir, equivalen a sensores situados en el vehículo de ensayo. Dentro de la categoría de variables relacionadas con los ejes se seleccionan cuatro de ellas, que se muestran en la Tabla 9.

Estas variables miden tanto el ángulo de vuelco como la velocidad a la que se produce. Esta medición se realiza respecto al eje del vehículo como se muestra en la Figura 26. Al tomar el sistema de referencia en el eje, la inclinación del terreno no supone una variación directa en este parámetro. En la imagen, θ es el ángulo de vuelco y $\dot{\theta}$ se corresponde con la velocidad de vuelco, siendo el sentido que se muestra el considerado positivo.

Tabla 9. Variables de salida

Variable		Nombre completo
1.	RoIR_A1r	Velocidad de vuelco relativa en grad/s. Eje delantero.
2.	RoIR_A2r	Velocidad de vuelco relativa en grad/s. Eje trasero.
3.	Roll_A1r	Ángulo de vuelco relativo en grados. Eje delantero.
4.	Roll_A2r	Ángulo de vuelco relativo en grados. Eje delantero.

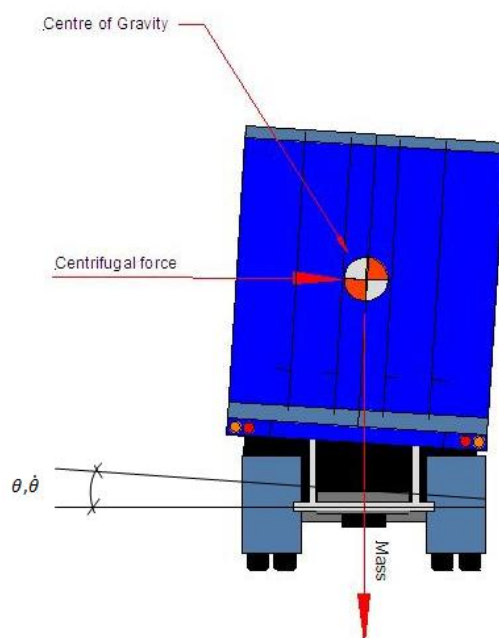


Figura 26. Diagrama de variables de salida [22].

5.2.2. Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada permiten exportar desde SIMULINK la información que necesita el sistema de suspensión activa para funcionar. Con este objetivo se utilizan, de entre las variables relacionadas con los amortiguadores, aquellas que actúan sobre la fuerza de los mismos (ver Tabla 10).

Al no incluirse los actuadores en el vehículo de ensayo, la modelación de la suspensión activa se realiza mediante estas variables de entrada. Los valores calculados en SIMULINK se sumarán a los que tiene el amortiguador en cada instante de tiempo. Esta “fuerza sumada” equivale al efecto que podría tener un actuador situado en cada una de los extremos del camión.

Tabla 10. Parámetros de entrada

Variable	Nombre completo
1. IMP_FD_L1	Fuerza en el amortiguador izquierdo en el eje delantero.
2. IMP_FD_R1	Fuerza en el amortiguador derecho en el eje delantero.
3. IMP_FD_L2	Fuerza en el amortiguador izquierdo en el eje trasero.
4. IMP_FD_R2	Fuerza en el amortiguador derecho en el eje trasero.

5.3. Coeficiente de transferencia de carga normalizado (CTC)

En la realización de este proyecto ha sido necesario incluir un coeficiente que permita determinar de una forma sencilla si el vehículo se acerca al límite de vuelco en algún momento del ensayo. Para ello se define el coeficiente de transferencia de carga [22]:

$$R = \frac{\Delta F_z}{m \cdot g} \quad (2)$$

Donde:

- R es el coeficiente de transferencia de carga normalizado (CTC).
- ΔF_z es la transferencia de carga de un lado a otro del vehículo.
- $m \cdot g$ es el producto de la masa del vehiculo por la gravedad.

Se trata de un coeficiente normalizado que toma valores entre ± 1 . Estos valores extremos se alcanzan cuando la totalidad del peso el vehículo se encuentra soportado por uno de los dos lados del mismo [23].

Para el cálculo de este coeficiente en el transcurso de la simulación es necesario añadir a las variables de salida de la sección 5.2.1 las variables que indican la carga que está soportando cada uno de los neumáticos (ver Tabla 11).

Tabla 11. Parámetros de salida adicionales para el coeficiente de transferencia de carga

Variable	Nombre completo	
5.	Fz_L1i	Carga en el neumático delantero izquierdo interior
6.	Fz_R1i	Carga en el neumático delantero derecho interior
7.	Fz_L2i	Carga en el neumático trasero izquierdo interior
8.	Fz_L2o	Carga en el neumático trasero izquierdo exterior
9.	Fz_R2i	Carga en el neumático trasero derecho interior
10.	Fz_R2o	Carga en el neumático trasero derecho exterior

Como el camión modelado dispone de ruedas gemelas en el eje trasero, se utilizan cuatro variables para la parte trasera y dos para la parte delantera. Para esta última se utiliza únicamente la variable correspondiente a la rueda interior al tratarse de rueda sencilla.

Una vez definidas las variables, se incluye en SIMULINK el circuito que se muestra en la Figura 27.

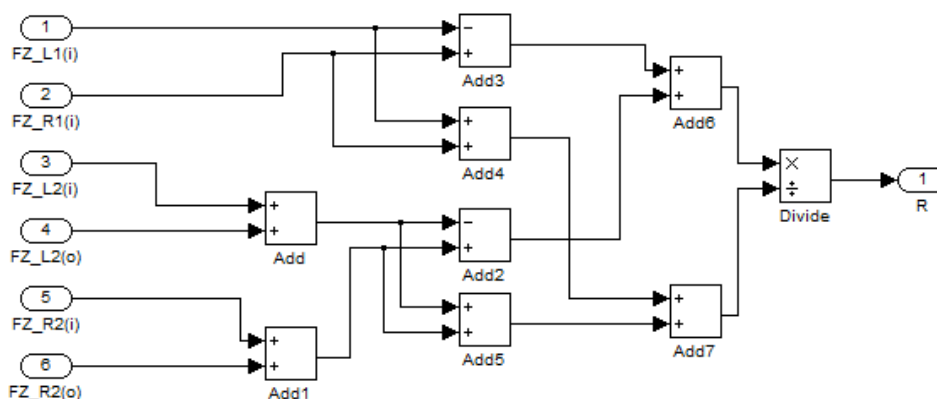


Figura 27. Subsistema de cálculo del coeficiente de transferencia de carga.

En primer lugar, se suman las cargas soportadas por cada uno de los lados del vehículo. La suma de la carga de los dos lados es igual al producto masa por gravedad de la ecuación (1). La diferencia entre la carga de cada lado es el numerador de la misma expresión. Dividiendo ambos valores se obtiene el coeficiente de transferencia de carga normalizado (CTC).

Por motivos estéticos se realiza el circuito de la Figura 27 como un subsistema aparte denominado "R.Calc" y no en el plano general, como se muestra en la Figura 28.

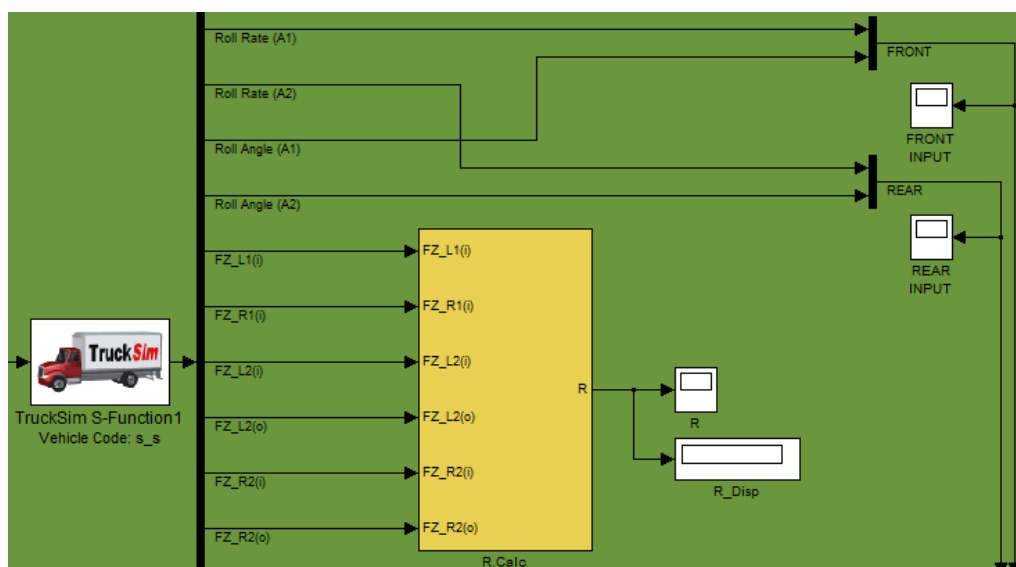


Figura 28. Disposición en SIMULINK de las variables de salida utilizadas

5.4. Sistema auxiliar: Detector de peralte

Cuando se realizan las primeras simulaciones se observa que el conjunto de reglas utilizado no es válido para todos los entornos. Por ello, cuando se da esta situación, es necesario efectuar una corrección en el sistema de forma automática.

Esta corrección resulta simple, ya que únicamente es necesario multiplicar la entrada al bloque "TruckSim S-Function" por ± 1 en función de las características del terreno. Cuando el camión se inclina debido a las irregularidades de la calzada, la transferencia de carga no se realiza de forma ideal, como se consideró en la sección 4.1.2.

Para ello se ha desarrollado un sistema que permite, en función del ángulo de giro del volante y la inclinación real (no relativa como hasta ahora), determinar en qué tipo de terreno se encuentra el vehículo.

Tabla 12. Variables de salida para el sistema auxiliar

Variable		Nombre completo
11.	Steer_SW	Posición del volante en grados
12.	Roll_E	Ángulo de vuelco del vehículo en grados
13.	AyBf_SM	Aceleración lateral en g's

Es necesario incluir estas variables (posición del volante e inclinación real) en las salidas del bloque “TruckSim S-Function”. Además se incluye el parámetro “aceleración lateral” para poder visualizar esta variable que puede resultar útil durante el análisis de resultados. Todas ellas se muestran en la Tabla 12.

Si el ángulo de giro del volante tiene un signo distinto al del ángulo de vuelco del vehículo se obtiene un +1. Si por el contrario, el signo es el mismo, se obtiene un -1.

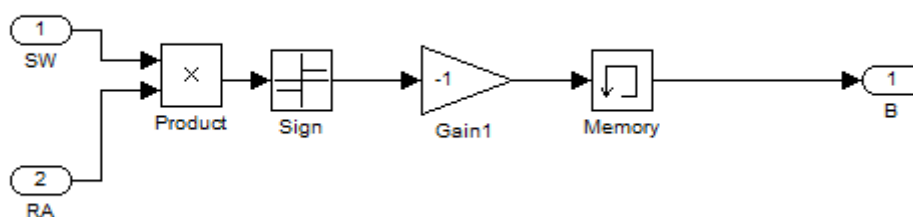


Figura 29. Sistema auxiliar de detección de peralte

En la Figura 29 se muestra el sistema esquematizado. En primer lugar, se realiza el producto de las salidas 11 y 12 (ver Tabla 12) y a continuación, mediante el bloque “Sign” se produce una función escalón que puede tomar como valor ± 1 .

Mediante un bloque “Gain” se multiplica el resultado por -1 para obtener el criterio deseado. Es necesario, al igual que con los controladores difusos, incluir un bloque “Memory” al final del sistema auxiliar. En la Figura 30 se muestra el sistema auxiliar en forma de subsistema por motivos estéticos, del mismo modo que se hizo para el sistema de control de la transferencia de carga (ver apartado 6.1.2.).

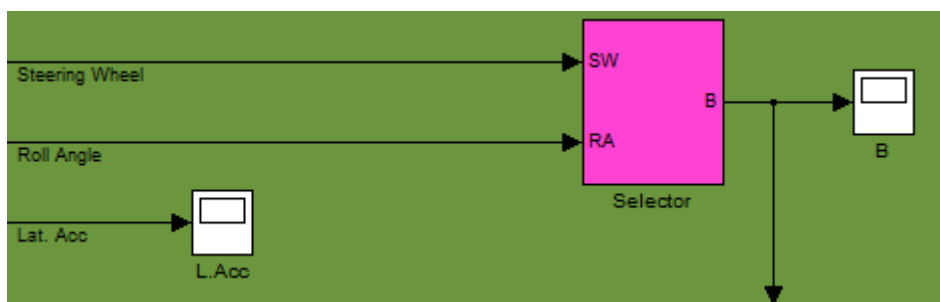


Figura 30. Detector de peralte como subsistema

5.5. Aplicación de la lógica difusa

En la Figura 31 se muestra la configuración final de los elementos de lógica difusa que se incluyen en el sistema con las características descritas en la sección 4.4. De izquierda a derecha se encuentran los dos bloques del tipo “Fuzzy Logic Controller”, uno para la parte delantera y otro para la trasera.

A continuación y por motivos relacionados con el funcionamiento interno de SIMULINK, es necesario añadir un bloque “Memory” después de cada controlador difuso.

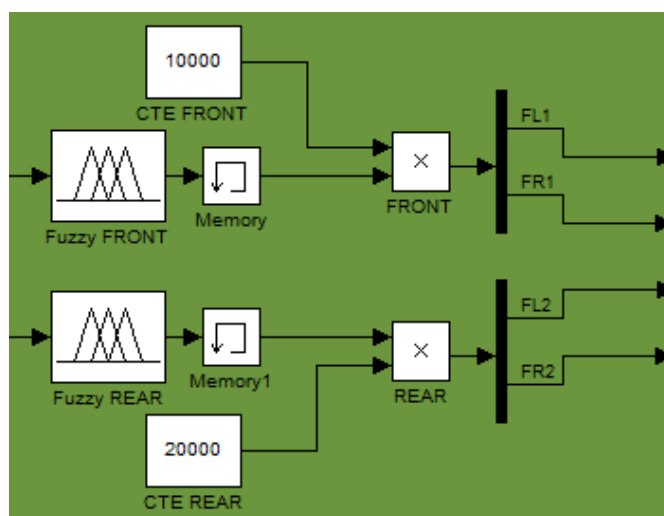


Figura 31. Disposición final en SIMULINK del conjunto de lógica difusa

La salida de los controladores, al estar normalizada, debe ser multiplicada por una constante, que indica la fuerza máxima que los actuadores realizarán. Para ello se incluyen los bloques “CTE Front” y “CTE Rear” que determinan esta fuerza en newtons. Estos factores permiten programar diferencias en la actuación del sistema en la parte delantera y la parte trasera sin necesidad de configurar el sistema difuso de formas distintas.

Finalmente mediante un “Demux” para cada controlador obtenemos una señal para cada uno de los cuatro actuadores.

5.6. Modificación del sistema. Tipos de sistemas.

Se han definido distintos tipos de sistemas mediante la modificación de los parámetros “CTE Front” y “CTE Rear” que se utilizarán en todas las simulaciones con el fin de encontrar la mejor configuración del sistema de control antivuelco.

5.6.1. Sistema Pasivo

En primer lugar es necesario realizar los ensayos con el sistema desactivado. De esta forma se pueden establecer las velocidades límite de paso por curva del vehículo y el coeficiente de transferencia de carga en cada caso. A partir de estos datos se podrá comprobar si el sistema es realmente efectivo.

Para configurar el sistema de esta forma basta con multiplicar por 0 la salida de ambos bloques de lógica difusa para anular el efecto sobre la suspensión (ver Figura 32).

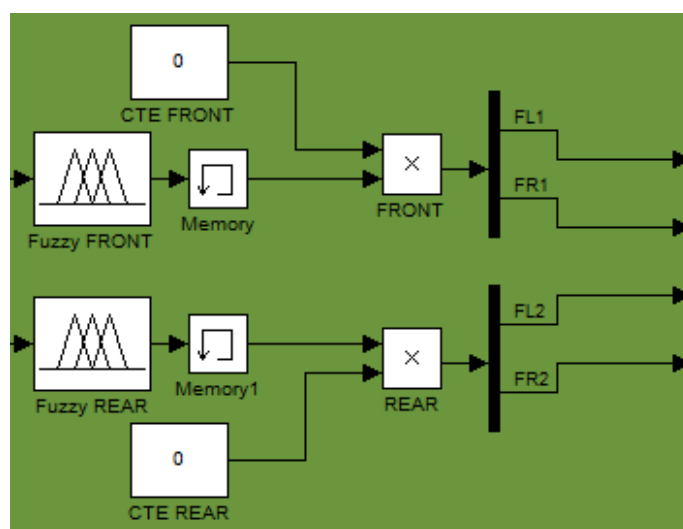


Figura 32. Sistema Pasivo

5.6.2. Sistema Activo 1

Para realizar los primeros ensayos con el sistema activado se ha elegido una configuración en la que se actúa de la misma forma tanto en el eje delantero como en el trasero.

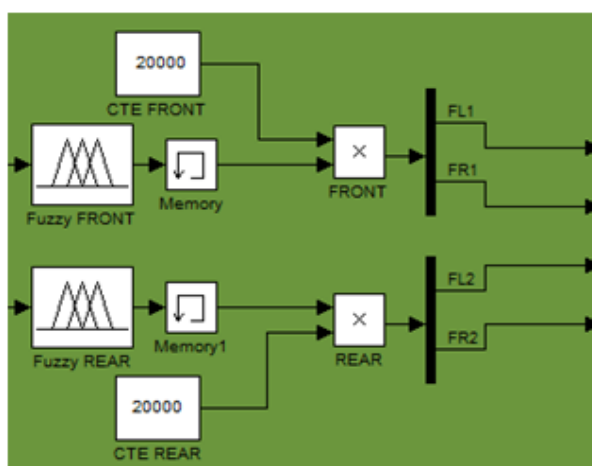


Figura 33. Sistema Activo 1

Para ello se configura el sistema de forma que cada actuador realice, como máximo, una fuerza de 20 kN. Se ha seleccionado este valor mediante el método de prueba y error, siendo del mismo orden de magnitud que la carga que soporta cada una de las ruedas cuando el vehículo circula en un terreno llano y en línea recta. Los factores de multiplicación utilizados se pueden ver en la Figura 33.

5.6.3. Sistema Activo 2

Cuando comienza el vuelco la rueda que comienza a levantarse en primer lugar es la trasera interior. Por este motivo se ensaya una configuración en la que el sistema actúa de forma más intensa en el eje trasero del vehículo en comparación con el delantero.

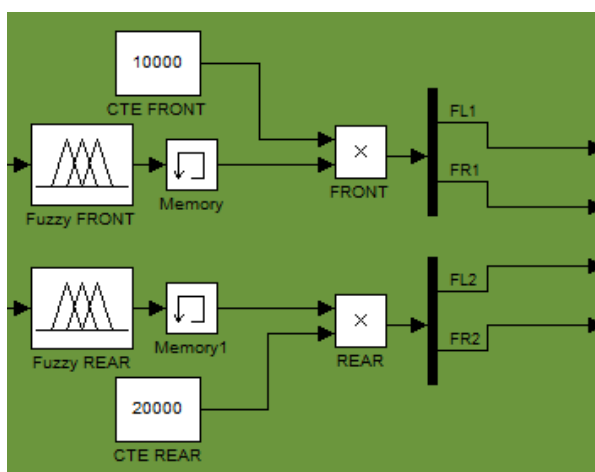


Figura 34. Sistema Activo 2

Para ello se configura el sistema para que la fuerza máxima en el eje delantero sea de 10 kN, mientras que en el trasero la fuerza máxima sea de 20 kN, como se muestra en la Figura 34

Esta configuración tiene la ventaja de que, al exigir un menor esfuerzo a los actuadores de la parte delantera, puede reducir la probabilidad de un fallo mecánico del sistema. Además se puede dar un abaratamiento del sistema ya que se pueden utilizar actuadores más simples la suspensión en el eje delantero.

5.6.4. Sistema Activo 3

La tercera configuración consiste en utilizar únicamente los actuadores de la parte trasera del vehículo. Para ello configura el sistema para que la fuerza en el eje delantero sea nula, mientras que en el trasero el máximo será de 15 kN, como se muestra en la Figura 35.

Se trata de una solución que permite una reducir a la mitad los componentes del sistema de suspensión activa, lo que supone un abaratamiento mayor al que se conseguía mediante el uso del Sistema Activo 2. Además la fuerza máxima ejercida es 5 kN menor que en los casos anteriores y por tanto el sistema de suspensión activa se verá menos exigido.

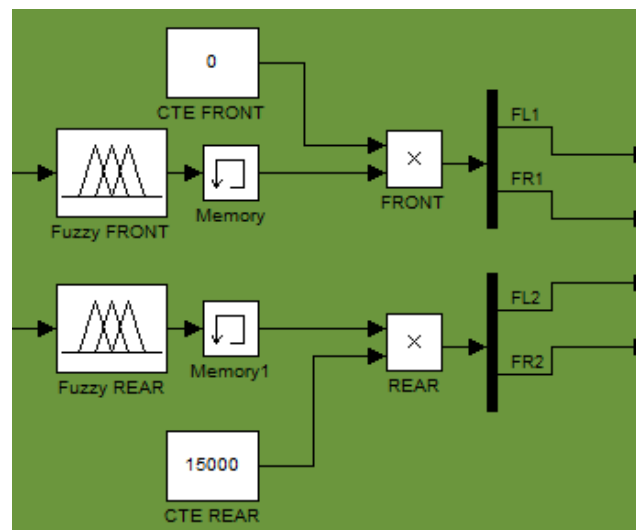


Figura 35. Sistema Activo 3

5.7. Sistema completo

En la Figura 36 se muestran todos los elementos que componen el sistema de control antivuelco. Aparecen numerados, de 1 a 5 con el fin de permitir identificarlos.

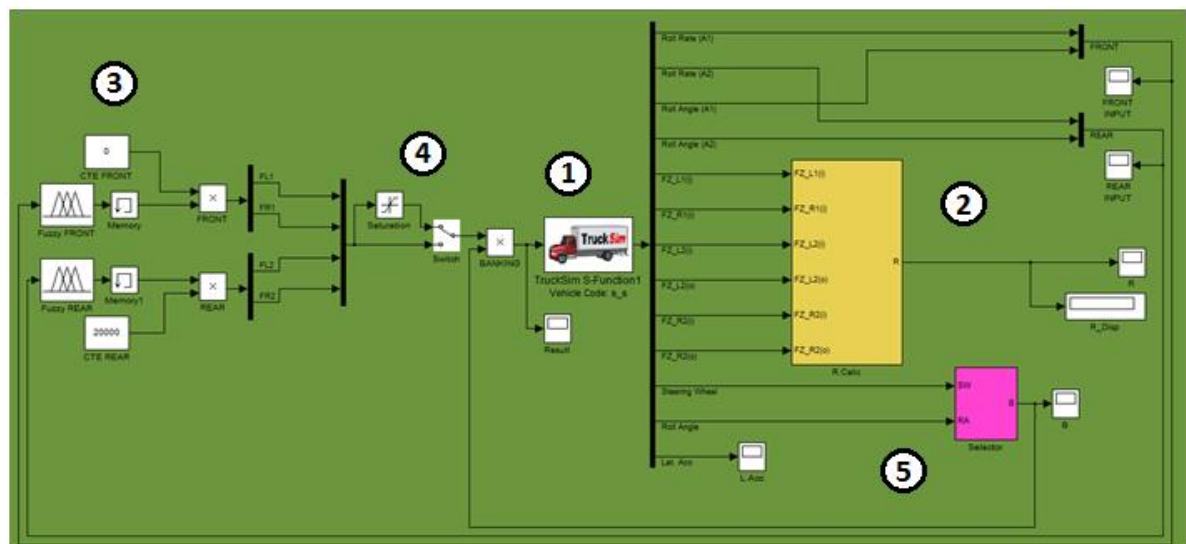


Figura 36. Sistema completo

El bloque “TruckSim S-Function” (1) proporciona la información referida al vehículo. En total dispone de 13 señales de salida.



Las cuatro primeras señales son portadoras de la información que se utiliza en el sistema de lógica difusa (3). Las seis siguientes se utilizan para calcular el coeficiente de transferencia de carga en el subsistema (2).

La señal referida al vuelco del vehículo llega a (3). Mediante la lógica difusa se generan cuatro señales, que se corresponden con cada uno de los actuadores del camión.

Estas señales se someten a un bloque de saturación. El objetivo de este bloque es proteger los elementos que forman la suspensión activa. Finalmente, se produce el retorno al bloque "TruckSim S-Function" (1). Los actuadores ejercerán la fuerza correspondiente a la señal recibida.

En la Figura 36 se puede apreciar también el subsistema de detección de peralte. Al estar conectado justo delante del retorno a (1) actúa sobre todas las señales al mismo tiempo, antes de ser recibidas por los actuadores.

Como se trata de un circuito cerrado, el sistema permite la corrección continua de la fuerza que ejerce cada actuador. Así, cuando el vehículo ha recuperado la estabilidad, puede volver a la configuración original.

6. Tipos de ensayos realizados

Para comprobar la eficacia del sistema es diseñado es necesaria la realización de pruebas sobre el vehículo en diferentes entornos. El software TruckSim permite la simulación de estas pruebas sin la necesidad de recurrir a una furgoneta real.

EL camión descrito en la sección 5.1 ha sido sometido a distintos ensayos, que permiten determinar el cambio en el comportamiento del vehículo durante el paso por curva cuando se instala el control antivuelco. Además, la posibilidad de probar distintas configuraciones permite reglar el sistema de forma que se obtenga la mejor actuación posible.

A continuación se describen cada uno de los distintos entornos en los que se han llevado a cabo simulaciones con el fin de evaluar el funcionamiento del sistema de control antivuelco.

6.1. Ensayo 1: Giro de 180° de volante sobre superficie plana

Este test se desarrolla sobre una superficie llana y sin obstáculos de área suficientemente grande como se muestra en la Figura 37. El vehículo, que circula en línea recta a velocidad constante, se somete a un giro repentino de volante de 180 grados hacia la izquierda.



Figura 37. Vehículo de ensayo sobre superficie llana y sin obstáculos

En la Figura 38 se muestra la posición del volante en cada instante de tiempo. Se puede observar que el giro de volante se realiza a los dos segundos de iniciar la simulación. En un espacio de tiempo de 0,7 segundos se realiza el giro completo.

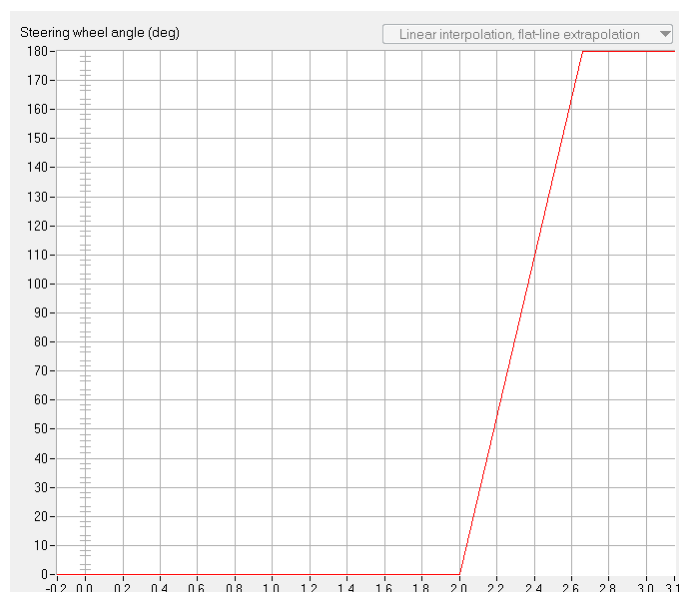


Figura 38. Giro de volante de 180°

Existe la posibilidad de realizar variaciones en este test. En primer lugar se puede variar la velocidad a la que se realiza el ensayo con el fin de llevar el vehículo hasta el punto de producirse el vuelco.

Además se puede establecer un mayor ángulo de giro del volante. En la Figura 39 se muestra una configuración para un giro de 270°.

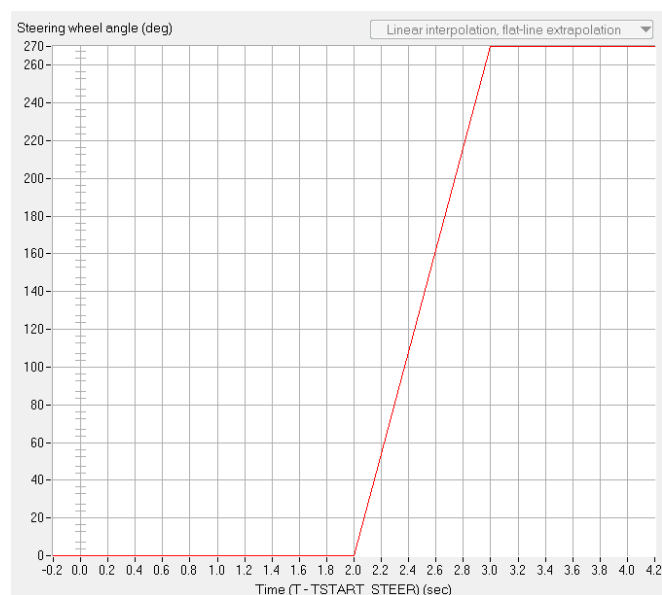


Figura 39. Giro de volante de 270°

En este ensayo el sistema de detección de peralte ofrece la señal de la Figura 40. Desde el momento en el que se produce el giro de volante se mantiene el valor de -1, que multiplica a la señal que entra en el bloque “TruckSim S-Function”.

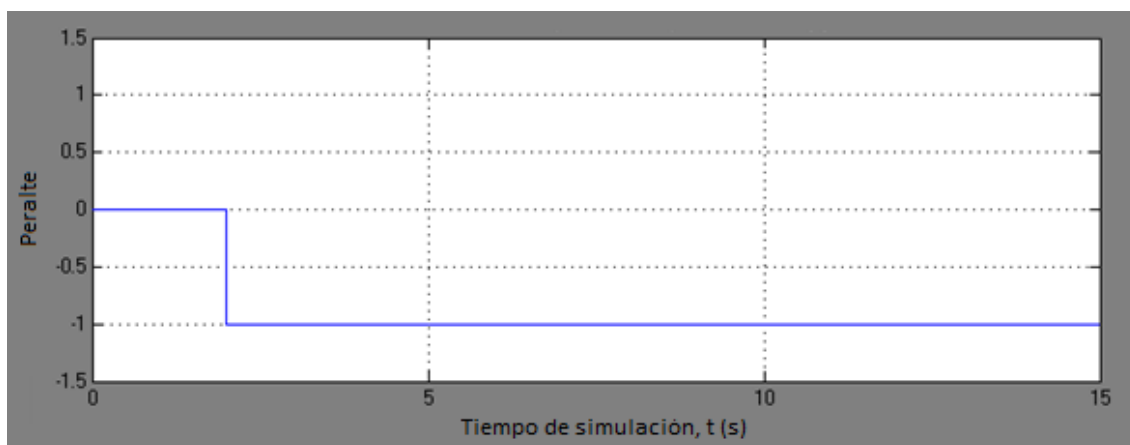


Figura 40. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 1

6.2. Ensayo 2: Anzuelo

Este test se desarrolla en el mismo escenario que se utilizó en el giro de 180° (ver sección 6.1). El vehículo describe una trayectoria que recuerda al anzuelo de un pescador, de ahí el nombre del test.

Al principio del ensayo, el vehículo avanza en línea recta con velocidad constante. En un determinado momento se realiza un giro de volante de 294° hacia la izquierda y acto seguido otro giro de volante hasta 294° hacia la derecha.

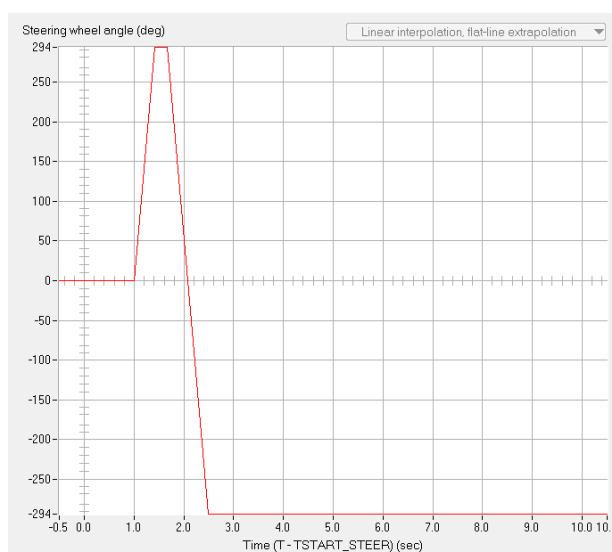


Figura 41. Posición del volante en cada instante de tiempo del ensayo 2.

En la Figura 41 se muestra el gráfico correspondiente a la posición del volante en cada instante de tiempo. El giro comienza a producirse un segundo después de comenzar la simulación. De forma casi inmediata, se lleva el volante hasta la posición opuesta y se mantiene hasta el final.

Este test se caracteriza por su exigencia. Al tratarse de un cambio muy brusco en el guiado de la furgoneta se producen fuerzas de inercia que hacen que el vehículo alcance a muy bajas velocidades el punto crítico antes del vuelco.

Con el fin de poder estudiar las transferencias de carga que se producen, se puede variar la velocidad a la que se realiza el ensayo, así como la posición máxima que alcanza el volante.

En la Figura 42 se muestra la salida del sistema auxiliar de detección de peralte. El valor obtenido es de -1 excepto en el instante en el que se produce el cambio de dirección.

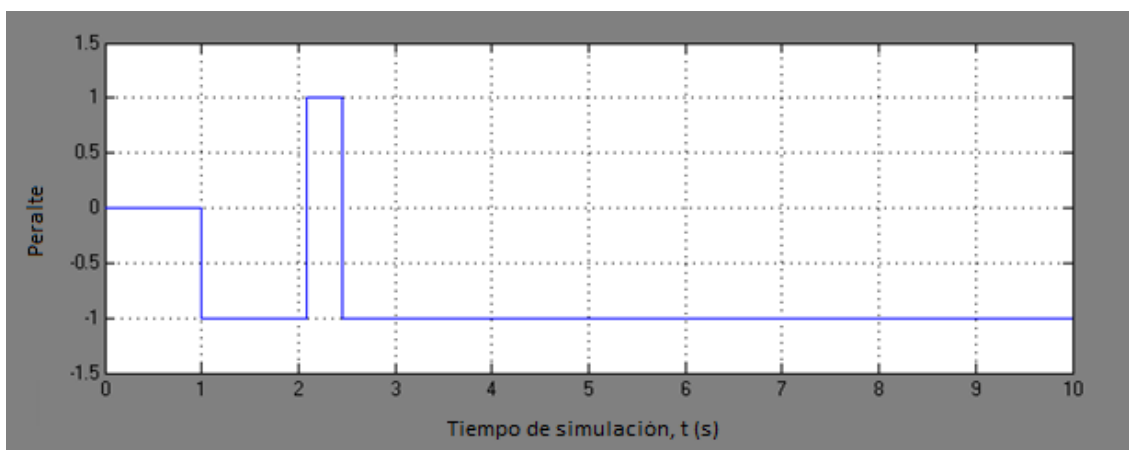


Figura 42. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 2

6.3. Ensayo 3. Circuito cerrado con pendiente y peralte

En este test se desarrolla en las dos primeras curvas del circuito de la Figura 43. En esta pista se dan dos condiciones que no se habían tenido en cuenta en los ensayos descritos hasta ahora: la rampa y el peralte.

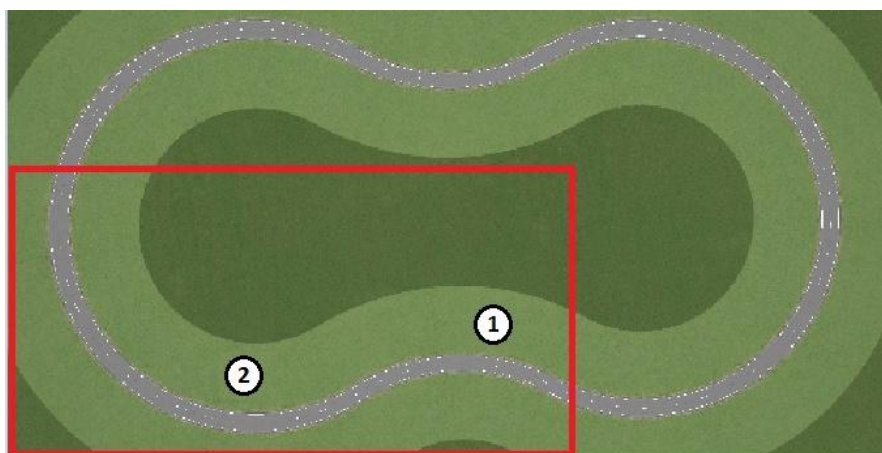


Figura 43. Vista aérea del circuito del ensayo 3

El vehículo comienza el test con una rampa y un ligero giro hacia la izquierda (curva 1) que se muestra en la Figura 44. Se puede observar también en esta figura el peralte de la pista. Estos factores afectan significativamente a la transferencia de carga y al funcionamiento del sistema (ver sección 5.4).



Figura 44. Curva 1 en el ensayo 3

A continuación el vehículo toma una curva hacia la derecha (curva 2), esta vez sin rampa, pero con un peralte muy acusado como se muestra en la Figura 45.



Figura 45. Curva 2 en el ensayo 3

Al realizar este test se puede comprobar la efectividad del control antivuelco en terrenos que no son uniformes, más parecidos a los que se pueden encontrar en las carreteras reales.

Como en el resto de ensayos se puede variar la velocidad a la que el vehículo circula por la pista, pero además existe la posibilidad de indicar la separación respecto del borde de la calzada que debe mantener el camión.

Debido a la inclinación de la calzada, el valor de la señal que se obtiene en este ensayo en el detector de peralte es de 1 durante toda la simulación excepto en el cambio de trayectoria.

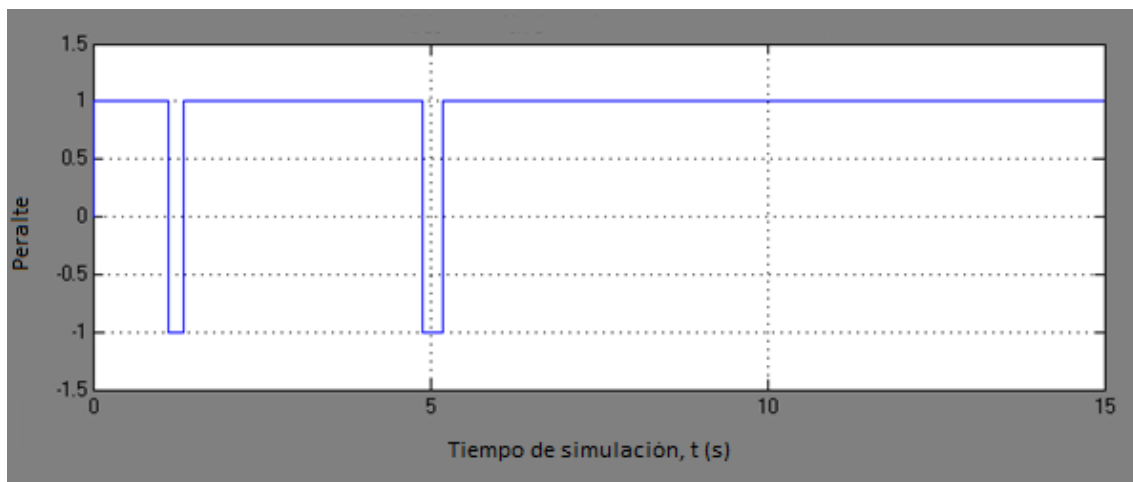


Figura 46. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 3

6.4. Ensayo 4: "Circuito en 8"

Este test se realiza en la primera curva del circuito que se muestra en la Figura 47. Se trata de una pista de características similares a las del *ensayo 3* (ver sección 6.3) pero con algunos elementos diferenciadores de gran importancia.

En primera lugar la curva cuenta con un peralte más agresivo que el que se encontraba en el anterior ensayo. Por otra parte, el radio de la curva es menor, lo que hace que el test sea mucho más exigente.

En la Figura 48 se puede apreciar tanto el peralte como el desnivel al se que somete el vehículo.

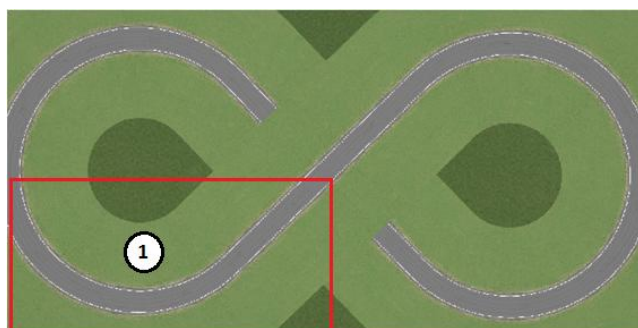


Figura 47. Vista aérea del circuito del ensayo 4



Figura 48. Curva 1 del "Circuito en 8"

Este test se realiza a velocidad constante. Resulta útil variar este valor para realizar ensayos de paso por curva en diferentes condiciones para acercarnos al punto crítico antes del vuelco.

En la Figura 49 se muestra la salida del sistema de detección de peralte, que es de valor 1 al igual que en el ensayo anterior.



Figura 49. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 4

6.5. Ensayo 5: Carretera real

El último ensayo se realiza en una carretera abierta. Se trata de un entorno en el que se intentan simular condiciones reales de circulación. El sistema de control antivuelco debe funcionar en cualquier situación, y no solo en entornos controlados como un circuito de pruebas.

En entornos controlados el vehículo puede realizar una trazada óptima al disponer del ancho completo de la calzada. En este ensayo, como se puede apreciar en la Figura 50, el vehículo debe mantenerse en su carril, al tratarse de una carretera de doble sentido.



Figura 50. Trazada del vehículo en el ensayo 5

El vehículo comienza la simulación en un tramo de carretera recta y se dirige a una zona compuesta por tres curvas enlazadas (Izquierda-derecha-izquierda) para terminar en un tramo recto.

Este test cuenta con la peculiaridad de contar con un terraplén a los lados de la calzada, el cual se muestra en la Figura 51. Este factor hace que el vehículo, en el momento que salga de la zona asfaltada, alcance rápidamente las condiciones críticas.



Figura 51. Terraplén a los lados de la calzada en el ensayo 5

Los peraltes en esta simulación son muy ligeros, similares a los que se puede encontrar en una carretera convencional.

El test permite variar la velocidad a la que se realiza el paso por curva como ya se hizo en ensayos anteriores.

En la Figura 52 se muestra la salida del sistema de detección de peralte en este ensayo. Debido a las características irregulares de la carretera de esta simulación, el valor oscila entre 1 y -1 durante todo el test.

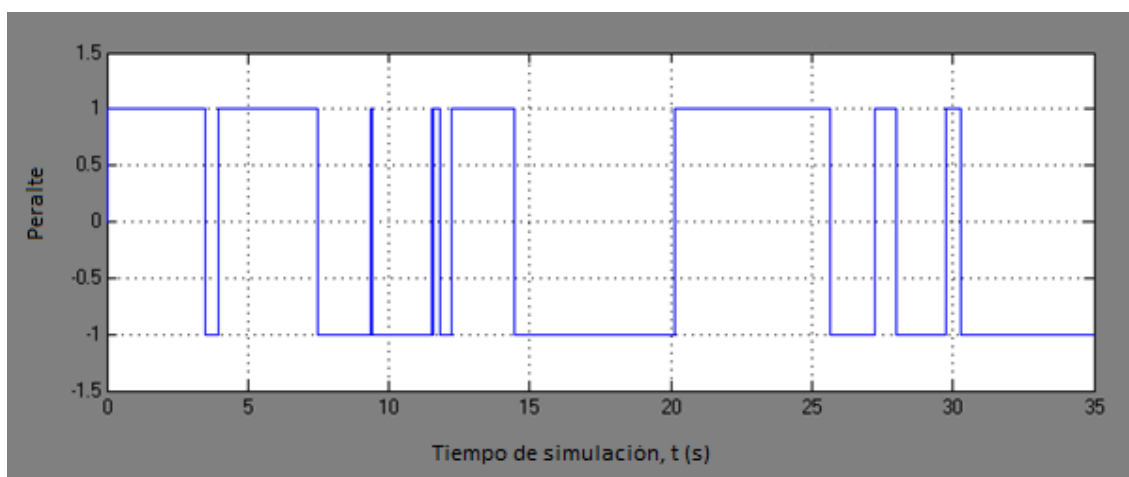


Figura 52. Señal de detección de peralte vs tiempo de simulación [s] – Ensayo 5



7. Resultados de simulación

Para estudiar el efecto del sistema de control antivuelco en el comportamiento del vehículo es necesario realizar los ensayos descritos en la sección 6 con los diferentes sistemas descritos en la sección 5.6. Las condiciones de los ensayos serán las mismas para todos los sistemas con el fin de poder comparar los resultados obtenidos de cada uno.

Se obtendrán las gráficas que muestran el coeficiente de transferencia de carga (CTC) con el fin de verificar la cercanía al límite de vuelco. Además, en los casos en los que sea posible, se analizará también la aceleración lateral.

Todas las graficas mostradas muestran el coeficiente de transferencia de carga normalizado (ver sección 5.3) o la aceleración lateral en función del tiempo (t), en segundos, que siempre estará en el eje de abscisas.

7.1. Sistema Pasivo

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el Sistema Pasivo (ver sección 5.6.1.).

7.1.1. Sistema Pasivo – Ensayo 1

La velocidad crítica de vuelco se determina mediante pruebas sucesivas, incrementando en cada una de ellas la velocidad a la que se realiza el ensayo. El test está configurado inicialmente a 40km/h, pero el camión no vuelca hasta realizar el test a 98 km/h.

Interesa, por una parte, realizar el test a 98 km/h para comprobar, posteriormente con otras configuraciones, si el sistema es capaz de evitar el vuelco. Por otra parte resulta importante realizar un estudio a una velocidad inferior a la que se produce el vuelco. Con ello se pretende comprobar si mejora el comportamiento dinámico del vehículo cuando se circula por debajo de la velocidad límite.

En primer lugar se realiza el ensayo 1 a una velocidad de 95 km/h, a la que no se produce el vuelco, y posteriormente se incrementa hasta 98 km/h, velocidad a la que sí se produce.

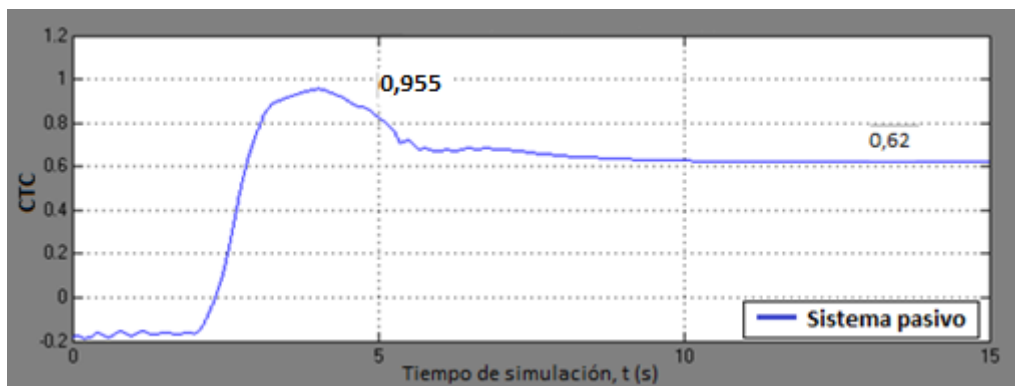


Figura 53. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 1 a 95 km/h



Figura 54. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 1 a 95 km/h

Como se observa en la Figura 53, el valor máximo para la transferencia de carga es de 0,955, muy cerca del valor límite 1. Cuando el giro se estabiliza el valor de la transferencia de carga es de 0,62.

La aceleración lateral, que se muestra en la Figura 54 alcanza un valor máximo de 0,61g's, estabilizándose en 0,45g's posteriormente.

Comparando ambas gráficas se puede observar que la evolución de la aceleración lateral durante la simulación es idéntica a la que sigue el coeficiente de transferencia de carga.

A continuación se incrementa la velocidad del vehículo hasta 98 km/h obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura 55.

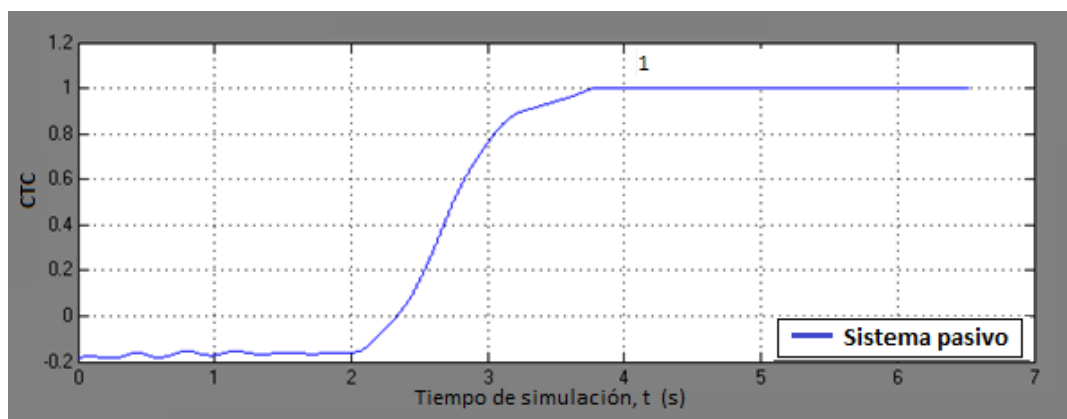


Figura 55. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 1 a 98km/h

El vehículo, al tomar la curva a 98 km/h, no es capaz de realizar el ensayo completo. Como se muestra en la Figura 56 el vehículo comienza a despegar las ruedas del suelo aproximadamente a los 4 segundos de comenzar el ensayo.

En este momento la estabilidad del vehículo deja de estar asegurada, y dos segundos después se produce el vuelco. Se muestra en la figura 49 el vehículo en $t=4$ s.



Figura 56. Vehículo en $t=4$ s, Sistema Pasivo, ensayo 1 a 98 km/h.

7.1.2. Sistema Pasivo – Ensayo 2

El segundo ensayo es un test más exigente para el vehículo que los demás, al tratarse se una sucesión de dos giros muy cerrados.

Por este motivo este ensayo se realizará a muy baja velocidad, con el objetivo de observar si se reduce la transferencia de carga y no si se evita el vuelco (que se produce a 53 km/h).

Se realiza el ensayo a 50 km/h obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 57 y en la Figura 58.



Figura 57. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 2 a 50 km/h

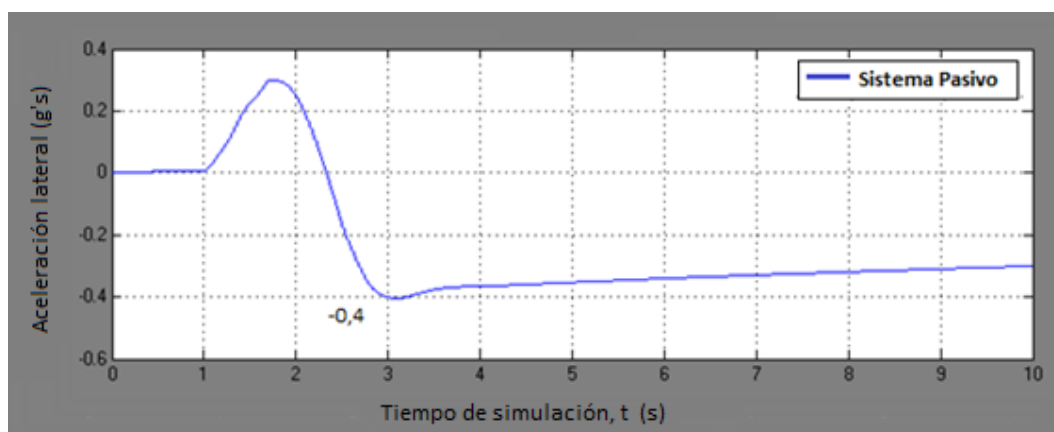


Figura 58. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 2 a 50 km/h

Como se observa en la Figura 57 el máximo valor de transferencia de carga se produce a los 3 segundos de iniciar la simulación ($t=3$ s), una vez se ha producido el segundo giro. En este momento $R=-0,73$. Al finalizar la simulación el valor del CTC es de $-0,61$.

La evolución de la aceleración lateral es nuevamente la idéntica que la de la transferencia de carga, alcanzando un valor máximo de $-0,4g's$.

7.1.3. Sistema Pasivo – Ensayo 3

Este test se realiza a 120 km/h, velocidad a la que se produce el vuelco. En la Figura 59 se puede observar la evolución del coeficiente de transferencia de carga con el tiempo durante esta simulación.

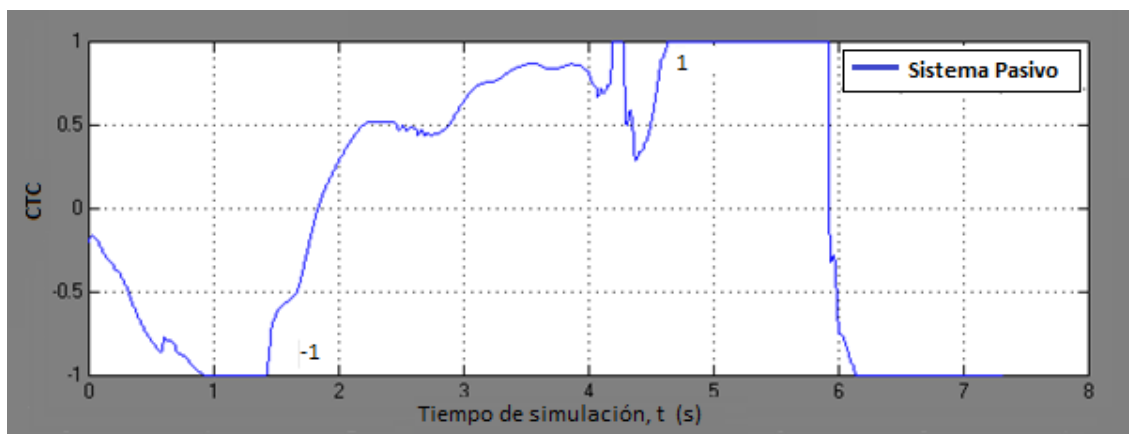


Figura 59. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 3 a 120 km/h

El coeficiente de transferencia de carga alcanza los valores críticos en los instantes $t=5$ s y $t=7$ s, correspondientes a las dos curvas que forman el ensayo. En la primera no se llega a producir el vuelco a pesar de despegarse dos ruedas del suelo (situación de riesgo muy elevado e inaceptable). Al tomar la siguiente se produce el vuelco del vehículo.

En las Figura 60 y en la Figura 61 se observa el vehículo en los dos instantes mencionados.



Figura 60. Vehículo en $t=5$ s, Sistema Pasivo, ensayo 3 a 120 km/h



Figura 61. Vehículo en $t=7$ s, Sistema Pasivo, ensayo 3 a 120 km/h

La curva de aceleración lateral se muestra en la Figura 62. Se observa como el valor alcanza los valores de $1g$ y $1,4g$'s en el momento en el que se toman las dos curvas.

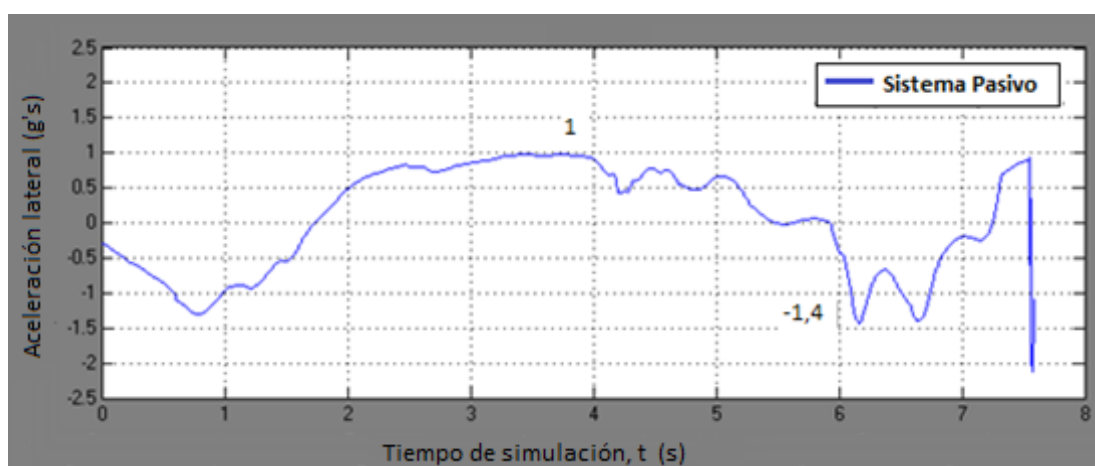


Figura 62. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 3 a 120 km/h

7.1.4. Sistema Pasivo – Ensayo 4

La velocidad a la que se produce el vuelco en el ensayo 4 es de 78 km/h. En primer lugar se realiza este test a 70 km/h para analizar la transferencia de carga. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 63 y en la Figura 64.

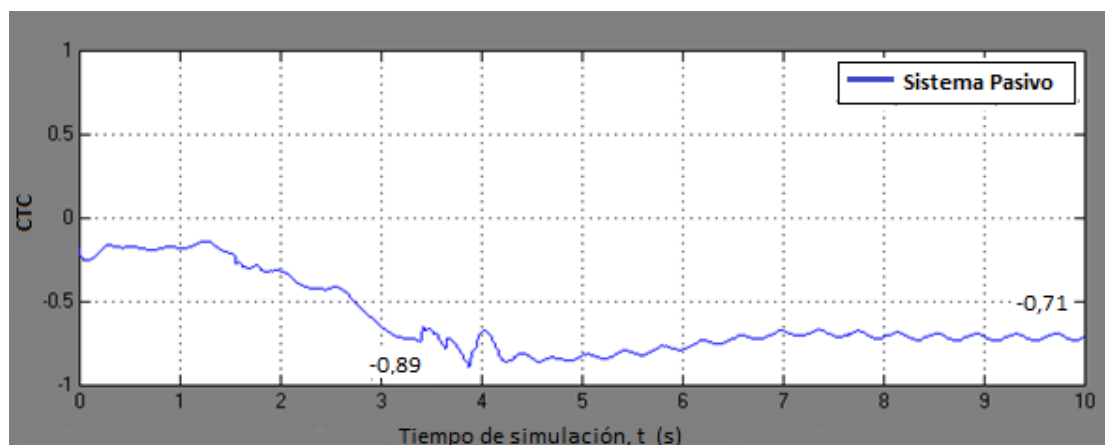


Figura 63. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 70 km/h

El valor máximo de transferencia de carga se alcanza en $t=3,9$ s. En este momento el CTC tiene el valor de 0,89. Su valor en $t=10$ s es de 0,71. De nuevo, el instante con una transferencia de carga máxima coincide con el momento en el que se tiene una mayor aceleración lateral (Figura 64).

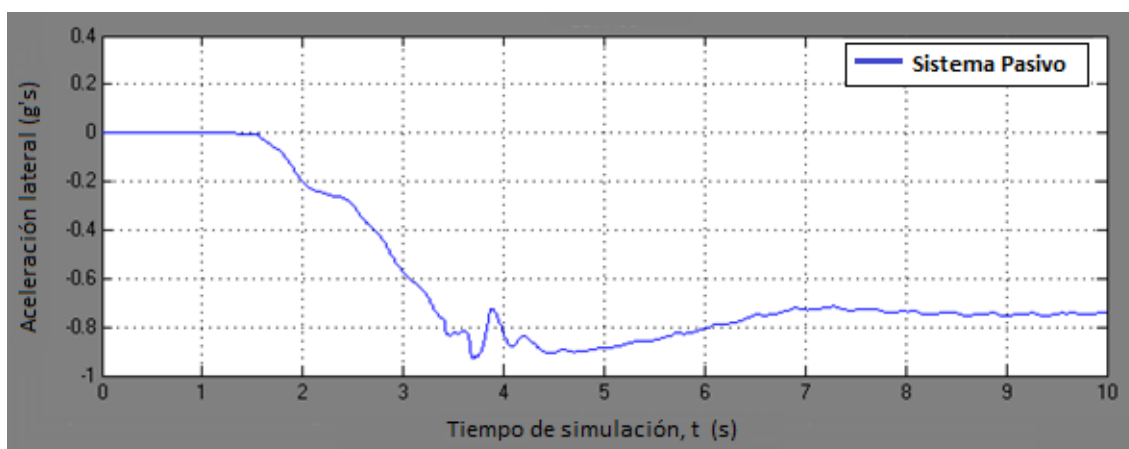


Figura 64. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 70 km/h

A continuación se realiza el mismo ensayo a 78 km/h, obteniendo los resultados para la transferencia de carga que se muestran en la Figura 65.

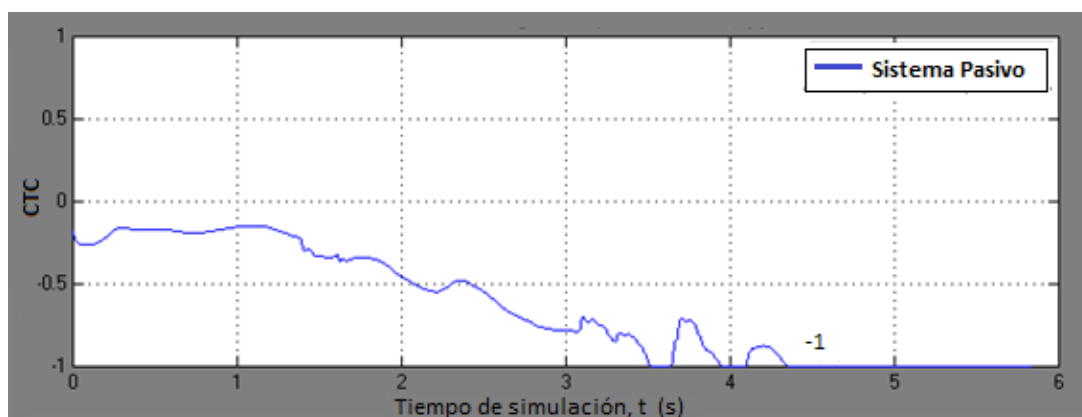


Figura 65. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 78 km/h

En $t=3,5$ s las ruedas del lado derecho del vehículo se despegan completamente del suelo. En este momento se inicia el vuelco.

La aceleración lateral supera el valor de 1 g en $t=3,5$ s. Cuando se produce el vuelco el valor desciende a 0 ($t=5$ s) y alcanza 0,5g's en sentido contrario en el momento de terminar la simulación (Figura 66).

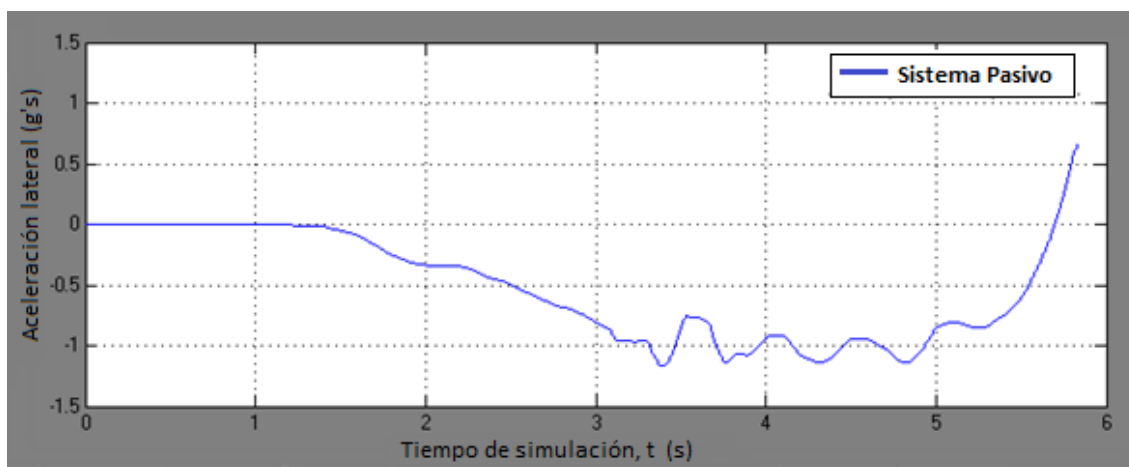


Figura 66. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 4 a 78 km/h

7.1.5. Sistema Pasivo – Ensayo 5

Como se muestra en la sección 6.5, este ensayo es semejante una carretera convencional, por lo que se busca simular la circulación del vehículo de la forma más realista posible. Por ello no se busca el límite de vuelco del vehículo.

El objetivo es simular la circulación a velocidad suficientemente alta para que el camión corra peligro de volcar o salirse de la calzada. De esta forma se puede comprobar si realmente el sistema de control antivuelco resulta útil.

La simulación se realizará por tanto a 90 km/h, velocidad máxima permitida en este tipo de vías en España [24]. A esta velocidad el vehículo tiende a salirse de la curva, aunque puede recuperar la trazada original, a pesar de pisar en breves espacios de tiempo el terraplén.



Figura 67. Transferencia de carga, Sistema Pasivo - Ensayo 5 a 90 km/h

En la primera curva a izquierdas, el coeficiente de transferencia de carga alcanza el valor de 0,87 en $t=8$ s (Figura 67). En este momento el vehículo pisa el terraplén con la parte trasera derecha. Se trata de una situación de riesgo, a pesar de no haber levantado ninguna rueda.

A continuación el vehículo se dirige a la siguiente curva a derechas. En $t=15$ s, el CTC alcanza el valor de -0,925. Se trata de una condición que se acerca al límite de vuelco. Además, como se puede observar en la Figura 68, el vehículo invade el carril contrario.



Figura 68. Vehículo de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16$ s

En la última curva, hacia la derecha nuevamente, el coeficiente de transferencia de carga alcanza el valor de 1 (ver Figura 67). El vehículo se encuentra en el límite de vuelco, levantando completamente dos ruedas como se muestra en la Figura 69.



Figura 69. Vehículo en $t=26$ s, Sistema Pasivo, ensayo 5 a 90 km/h

En la Figura 70 se muestra la evolución del valor de la aceleración lateral para cada instante de tiempo. Alcanza un valor máximo de 0,75 g's en $t=26$ s, coincidiendo con el momento de mayor transferencia de carga.

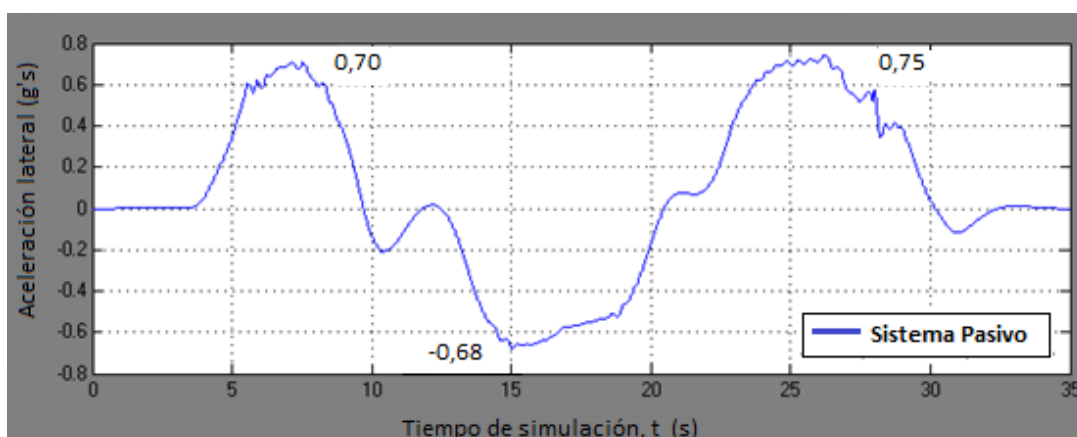


Figura 70. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 5 a 90 km/h

7.2. Sistema Activo 1

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el Sistema Activo 1 (ver sección 5.6.2).

7.2.1. Sistema Activo 1 - Ensayo 1

Se realiza el ensayo a 95 km/h, al igual que se hizo con el Sistema Pasivo. A esta velocidad se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 71 y en la Figura 72.

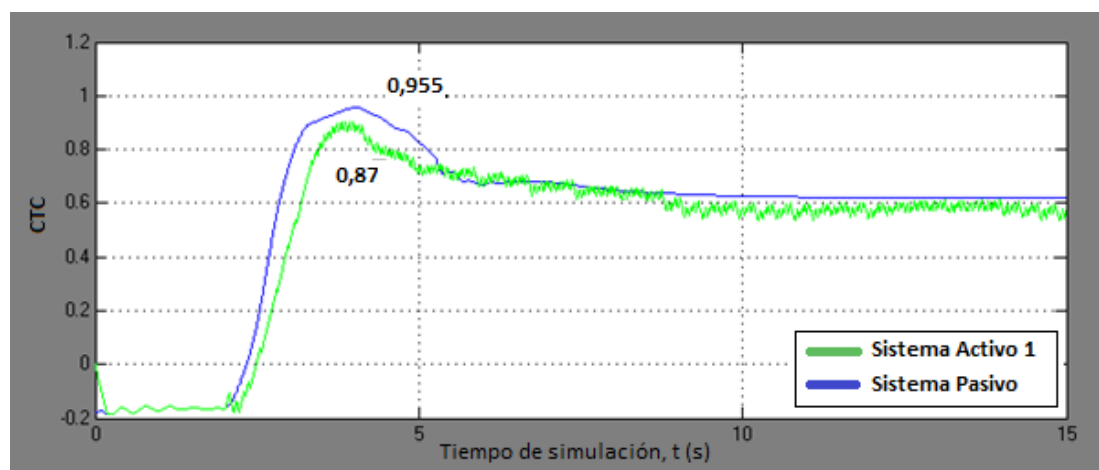


Figura 71. Transferencia de carga. Sistema Activo 1 - Ensayo 1 a 95 km/h

En la Figura 71 se observa la evolución del coeficiente de transferencia de carga a lo largo de la simulación. Se observa que este coeficiente es menor que en la realización de la simulación con el Sistema Pasivo (gráfica azul en la Figura 71). En $t=4$ s el valor máximo es de 0,87 frente al máximo anterior de 0,955. Al final de la simulación, con el vehículo estabilizado el valor de la transferencia de carga se reduce desde 0,61 a 0,57.

La evolución de la aceleración lateral se muestra en la Figura 72.

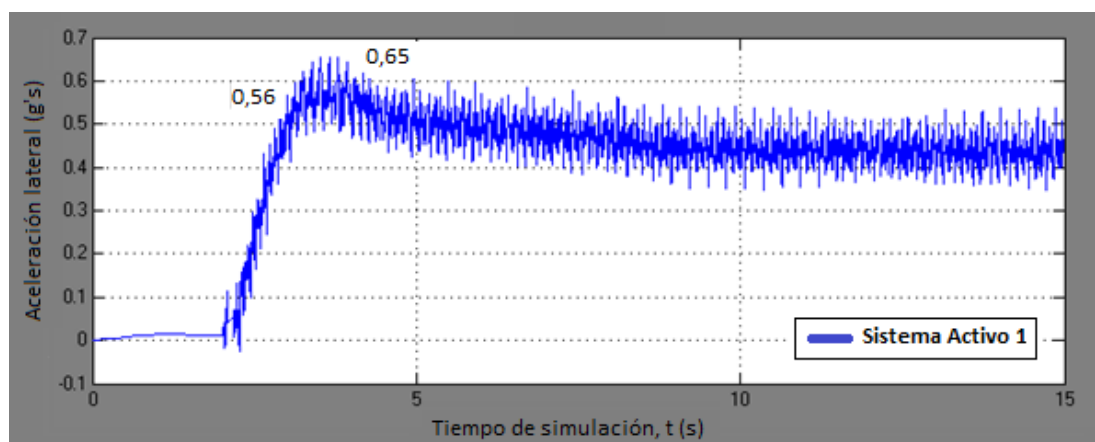


Figura 72. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 1 a 95 km/h

El valor medio máximo de la aceleración lateral es de 0,56 g's. Supone una reducción respecto del valor obtenido en el ensayo con el sistema desactivado, de 0,61.

Para el mismo test, realizado a 98 km/h, los resultados obtenidos son los que se muestran en la Figura 73 y en la Figura 74.

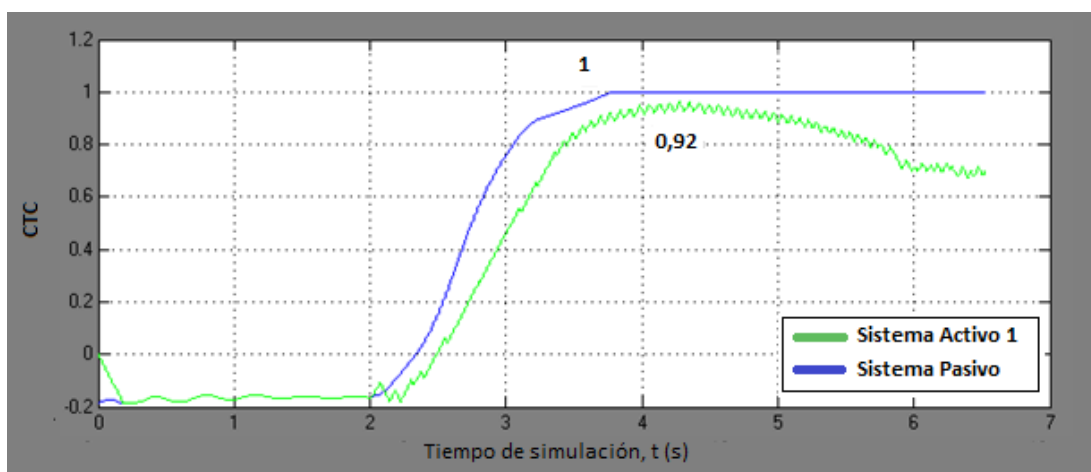


Figura 73. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 1 a 98km/h

Utilizando esta configuración se puede realizar el ensayo completo sin que se produzca el vuelco del vehículo (ver Figura 74), lo cual supone una mejora muy importante del comportamiento del camión. En esta misma figura se puede observar que el vehículo amarillo toma la curva con un radio mayor que el azul. Se trata de una tendencia al subviraje que en este entorno no tiene mayores consecuencias ya que no hay una calzada definida. El valor máximo del CTC es de aproximadamente 0,92 (ver Figura 73).



Figura 74. . Vehículo en $t=5$ s, Sistema Activo 1, ensayo 1 a 98 km/h

En cuanto a la aceleración lateral, el valor máximo se alcanza de nuevo en el momento de máxima transferencia de carga. En este momento se alcanzan los 0,55 g's y puntualmente los 0,68.

7.2.2. Sistema Activo 1 - Ensayo 2

Tras la realización del ensayo en las condiciones descritas se obtienen los siguientes resultados.

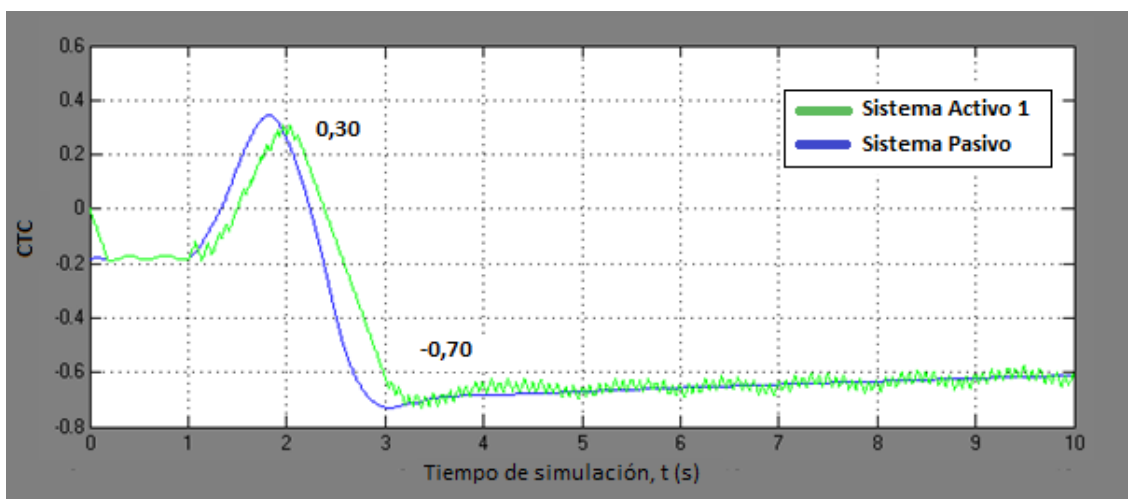


Figura 75. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 2 a 50 km/h

En este caso los valores para la transferencia de carga son muy similares a los que se obtuvieron cuando se realizó la simulación con el sistema desactivado, aunque la gráfica se desplaza ligeramente hacia la derecha (ver Figura 75). Con esta configuración, no se obtiene una reducción apreciable del coeficiente de transferencia de carga del vehículo en este test.

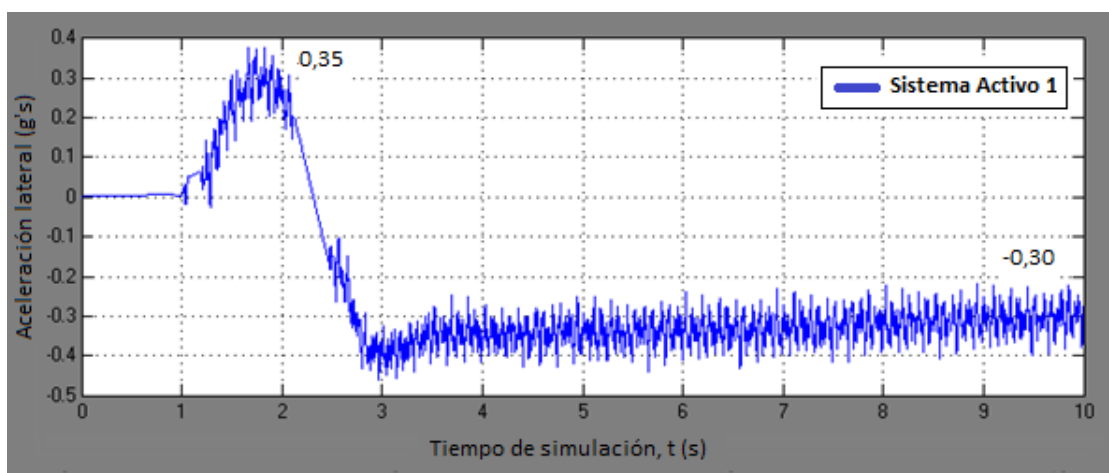


Figura 76. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 2 a 50 km/h

Al igual que con la transferencia de carga, la aceleración lateral no sufre gran variación respecto a la que se dio con el sistema desactivado (ver Figura 76).

7.2.3. Sistema Activo 1 - Ensayo 3

Con el sistema de control antivuelco activado, el vehículo es capaz de realizar la simulación completa sin que se produzca el vuelco.

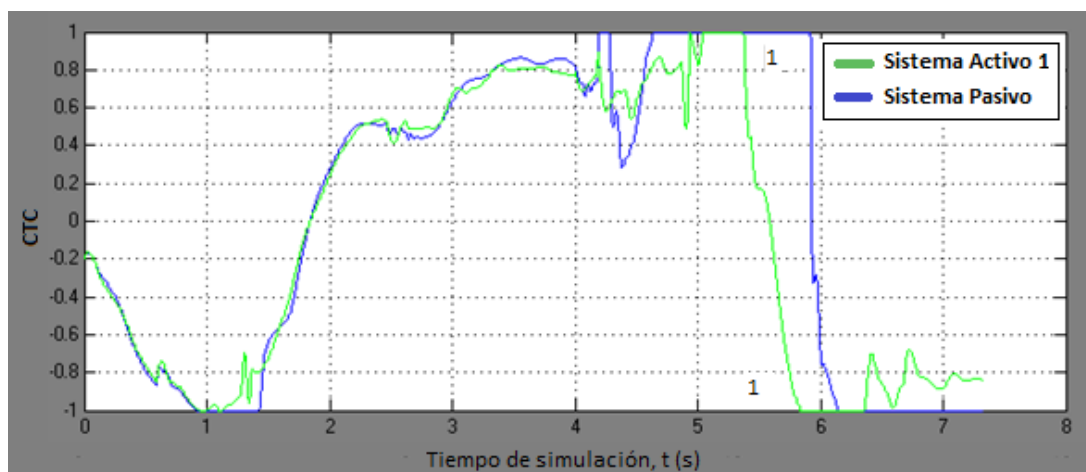


Figura 77. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 3 a 120 km/h

En $t=5$ s y $t=6$ s se alcanza brevemente el valor crítico de transferencia de carga (sin despegar las ruedas del suelo) para después reducirse y situarse por debajo del valor alcanzado con el Sistema Pasivo (ver Figura 77). Como se puede observar en la Figura 78 y en la Figura 79, el comportamiento del vehículo en estos instantes ha mejorado sustancialmente. En estas figuras, el vehículo azul es el que realizó el test con el Sistema Pasivo mientras que el naranja es el que utiliza el Sistema Activo 1.



Figura 78. Vehículo en $t=5s$, Sistema Activo 1, ensayo 3 a 120 km/h



Figura 79. Vehículo en $t=7s$, Sistema Activo 1, ensayo 3 a 120 km/h

7.2.4. Sistema Activo 1 - Ensayo 4

Tras realizar el ensayo 4 a 70 km/h se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 80 y en la Figura 81.

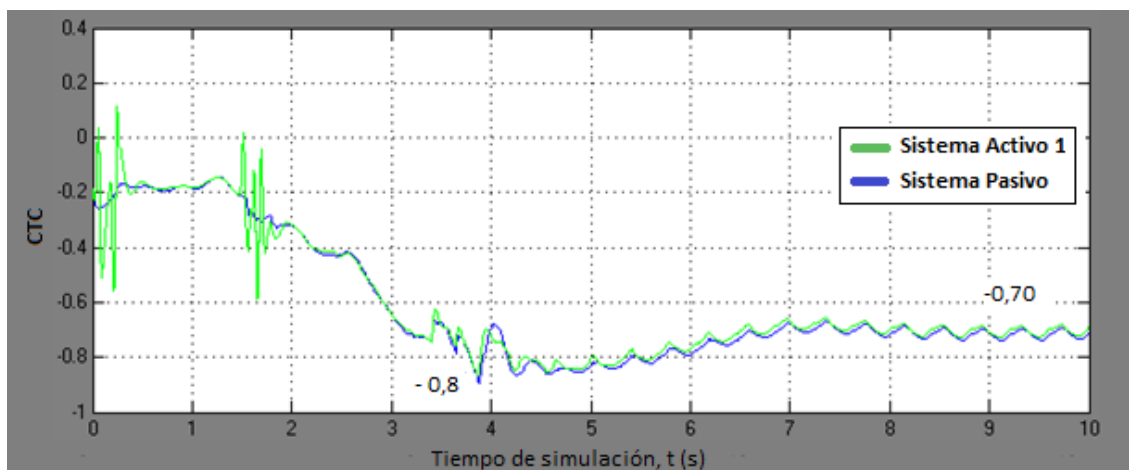


Figura 80. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 70 km/h

El valor máximo de la transferencia de carga apenas se reduce como se observa en la Figura 80. El valor del CTC una vez estabilizado el vehículo en la curva es de 0,7 al igual que en el ensayo con el Sistema Pasivo.

En cuanto a la aceleración lateral (ver Figura 81), su valor máximo se encuentra en torno al mismo valor que cuando se realizó el ensayo con el Sistema Pasivo.

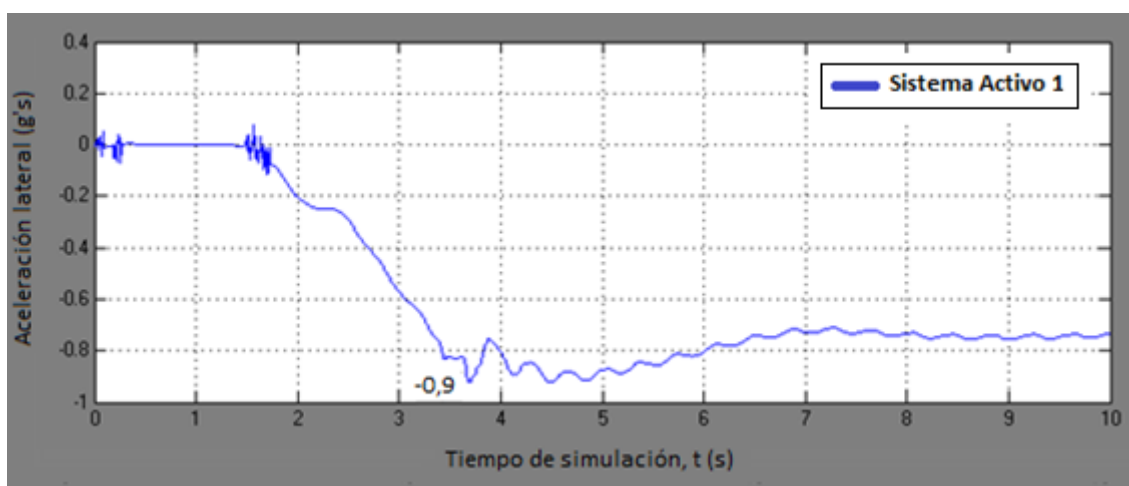


Figura 81. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 70 km/h

A partir del ensayo a 78 km/h se obtiene la gráfica para la transferencia de carga que se muestra en la Figura 82.

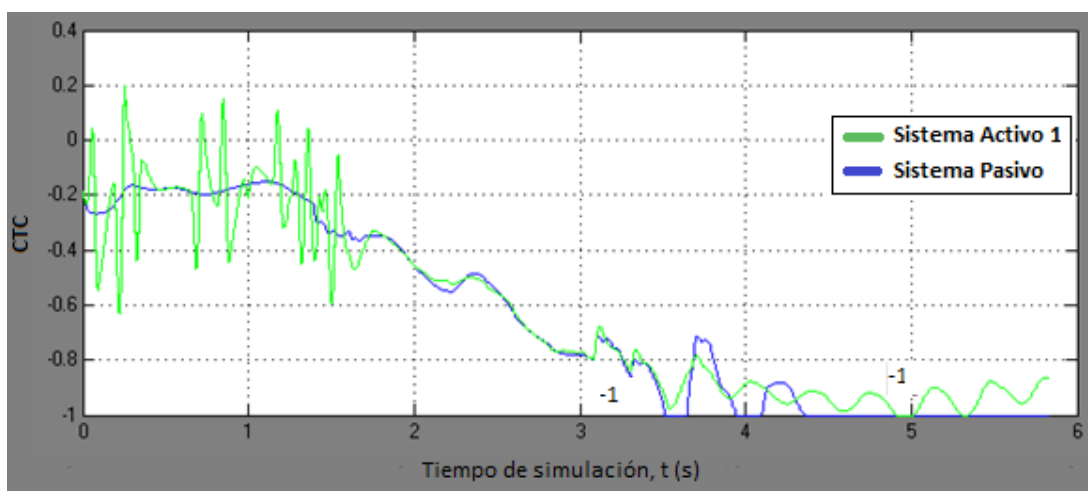


Figura 82. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 78 km/h

Con el sistema desactivado se producía el vuelco en $t=5$ s. En este instante el coeficiente de transferencia de carga alcanza momentáneamente el valor de -1 (sin que ninguna de las ruedas se levante del suelo), aunque seguidamente se estabiliza sin que se produzca el vuelco.

En la Figura 83 se muestra la comparativa entre los dos vehículos en $t=5$ s. Al igual que sucede en la sección 7.1.4, el comportamiento del vehículo mejora sustancialmente. El vehículo naranja de esta figura lleva el Sistema Activo 1 mientras que el azul utiliza el Sistema Pasivo



Figura 83. Vehículo en $t=5$ s, Sistema Activo 1, ensayo 3 a 120 km/h

La aceleración lateral alcanza su máximo en el instante $t=3,5$ s, con un valor de $1.1g$'s como se muestra en la Figura 84.

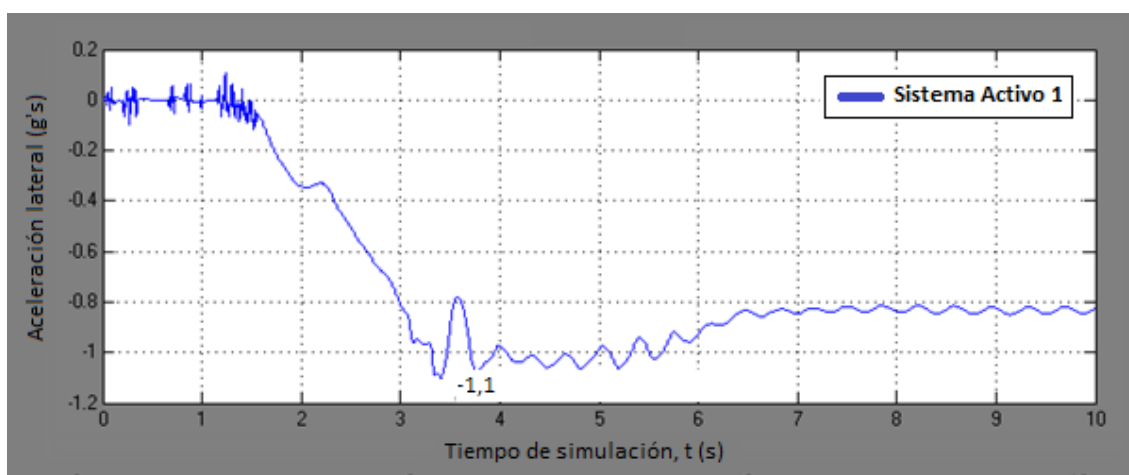


Figura 84. Aceleración lateral, Sistema Activo 1 - Ensayo 4 a 78 km/h

7.2.5. Sistema Activo 1 - Ensayo 5

La realización de este ensayo en las condiciones descritas en el apartado 6.5 con el Sistema Activo 1 ofrece los siguientes resultados.

La evolución de la transferencia de carga se muestra en la figura 79. En ella se observa como los valores obtenidos en $t=8$ s y $t=15$ s son similares a los que se obtuvieron al realizar el ensayo con el sistema de control antivuelco desactivado. Sin embargo, en $t=26$ s el valor de 1 se alcanza puntualmente sin que lleguen a separarse las ruedas del suelo, siendo el valor medio en ese instante de 0,95. Con el Sistema Pasivo, se mantiene el valor de 1 durante un tiempo prolongado y además las ruedas se despegan del suelo.

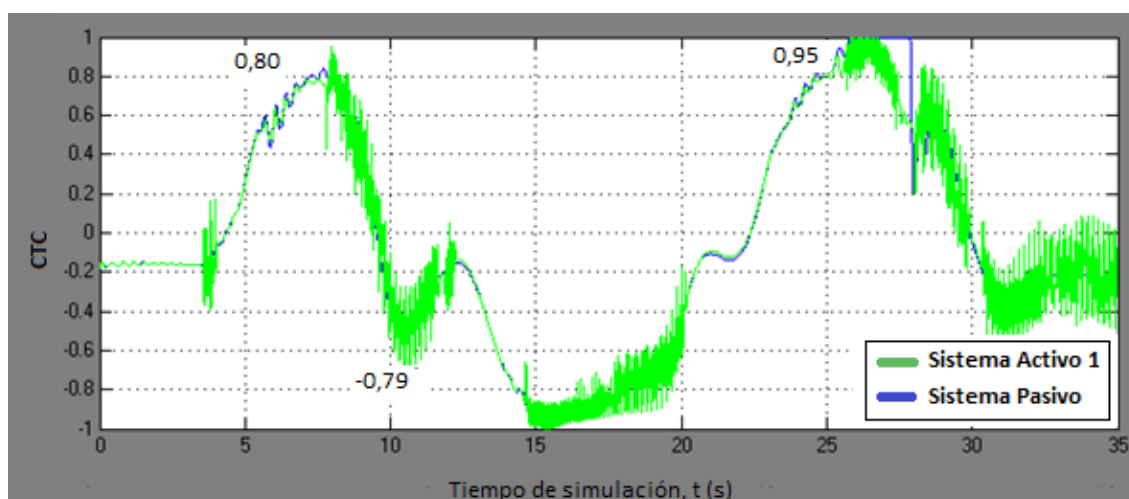


Figura 85. Transferencia de carga, Sistema Activo 1 - Ensayo 5 a 90 km/h

En la figura 80 se muestra la mejora en el paso por la curva 3 del vehículo naranja, que equipa el Sistema Activo 1. El vehículo azul, que utiliza el Sistema Pasivo, despega las ruedas del suelo en el momento de máxima transferencia de carga.



Figura 86. Vehículo en $t=27$ s, Sistema Activo 1, ensayo 5 a 90 km/h

La aceleración lateral alcanza los valores que se muestran en la figura 81. Sus valores para cada instante de tiempo son similares a los que se obtuvieron con el Sistema Pasivo, a pesar de que el vehículo no llega las condiciones críticas que alcanzaba.

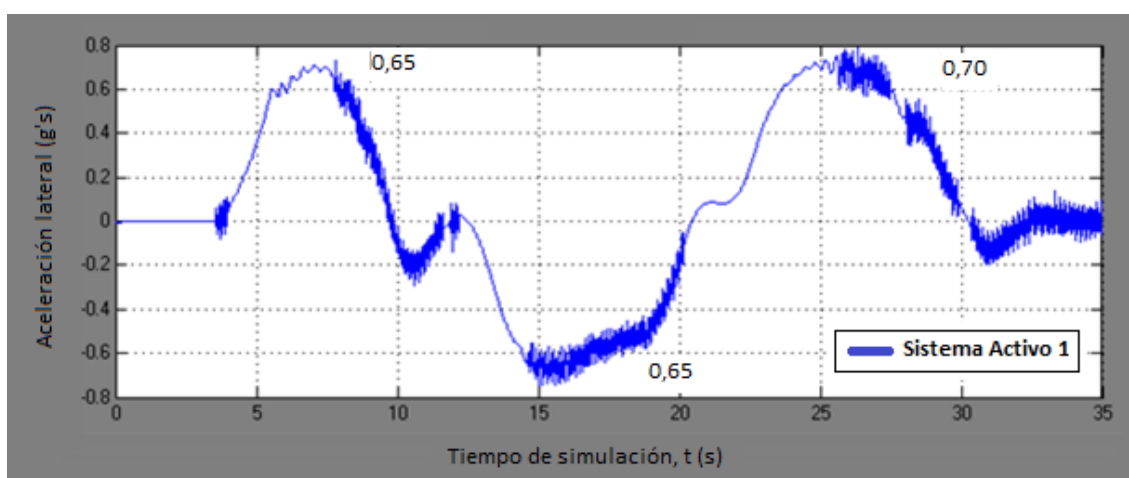


Figura 87. Aceleración lateral, Sistema Pasivo - Ensayo 5 a 90 km/h

Otro punto que se analizó para el Sistema Pasivo es la trazada. En la curva 2 el vehículo invadía el carril contrario (ver figura 61). En la figura 82 se muestra como no se produce ninguna mejora en este aspecto. De hecho, el vehículo con el sistema activado (naranja) muestra una ligera tendencia al subviraje, trazando la curva con un radio mayor, como ya sucedía en el ensayo 1 (ver sección 7.2.1.).



Figura 88. Vehículos de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16$ s (2)

Sin embargo en la figura 83 si que se observa una mejora en el tiempo en el que se tarda en realizar el paso por el vehículo, al ser capaz de mantener la velocidad de 90 km/h por todo el recorrido. El vehículo azul, (con el sistema desactivado) termina la simulación unos metros por detrás del naranja.



Figura 89. Diferencia de posición de los vehículos de ensayo en $t=35$ s

7.3. Sistema Activo 2

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el Sistema Activo 2 (ver sección 5.6.3).

7.3.1. Sistema Activo 2 - Ensayo 1

Para el ensayo 1 a 95 km/h se obtienen los resultados de simulación que se muestran en la Figura 90 y en la Figura 91.

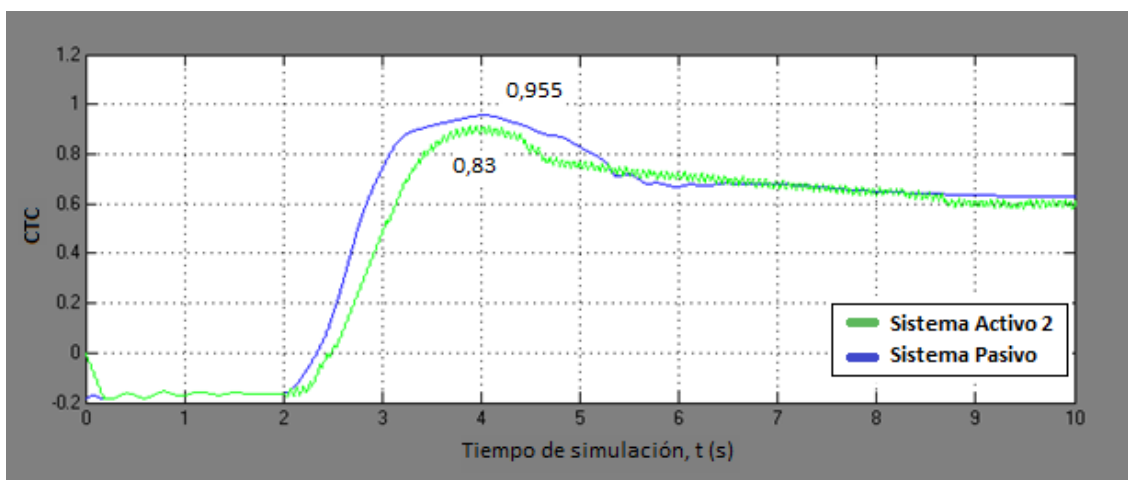


Figura 90. Transferencia de carga. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 95 km/h

Como se observa en la Figura 90 los valores máximos para la transferencia de carga son del mismo orden que los obtenidos con el Sistema Activo 1. El valor máximo se encuentra en torno a 0,83 y una vez estabilizado el vehículo en torno a 0,6.

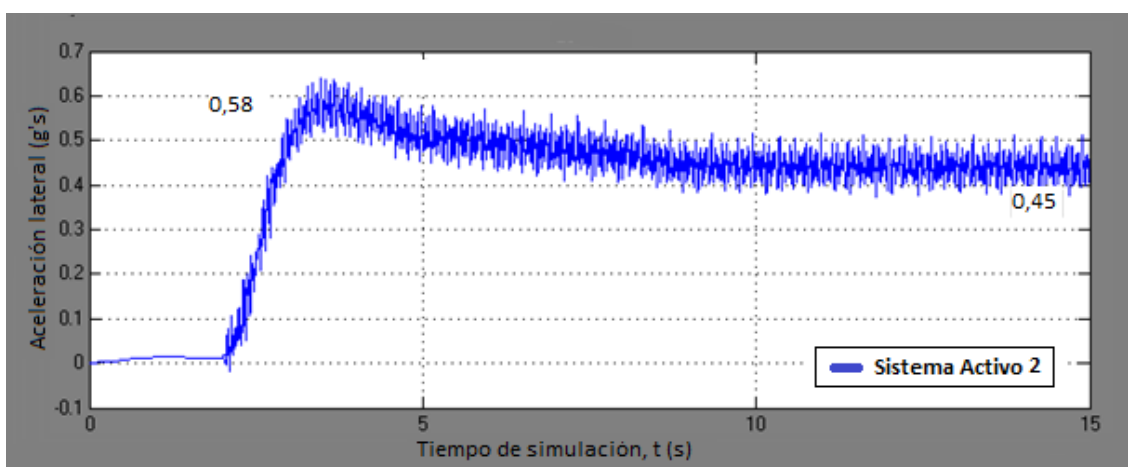


Figura 91. Aceleración lateral. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 95 km/h

La aceleración lateral tiene su máximo en torno a $0,6g's$, siendo este valor muy similar al obtenido con el Sistema Activo 1 como se observa en la Figura 91.

Para el ensayo a 98 km/h se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 92 y en la Figura 93.

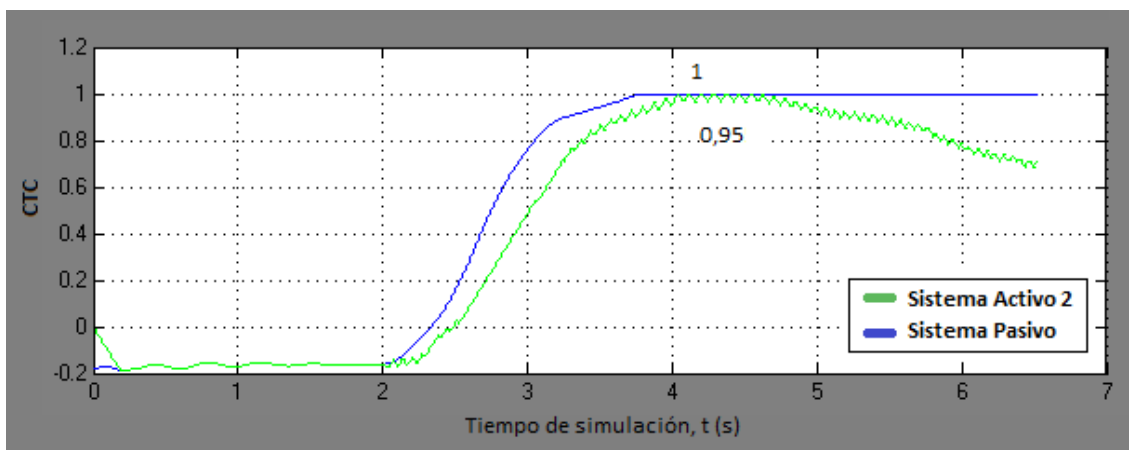


Figura 92. Transferencia de carga. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 98 km/h

El valor máximo es ligeramente mayor que con el Sistema Activo 1. El CTC tiene un valor máximo superior a 0,95 (ver Figura 92), mientras que anteriormente éste se encontraba en torno a 0,92. Sin embargo se trata de un aumento pequeño y se evita el vuelco del vehículo, por lo que el sistema sigue siendo efectivo.

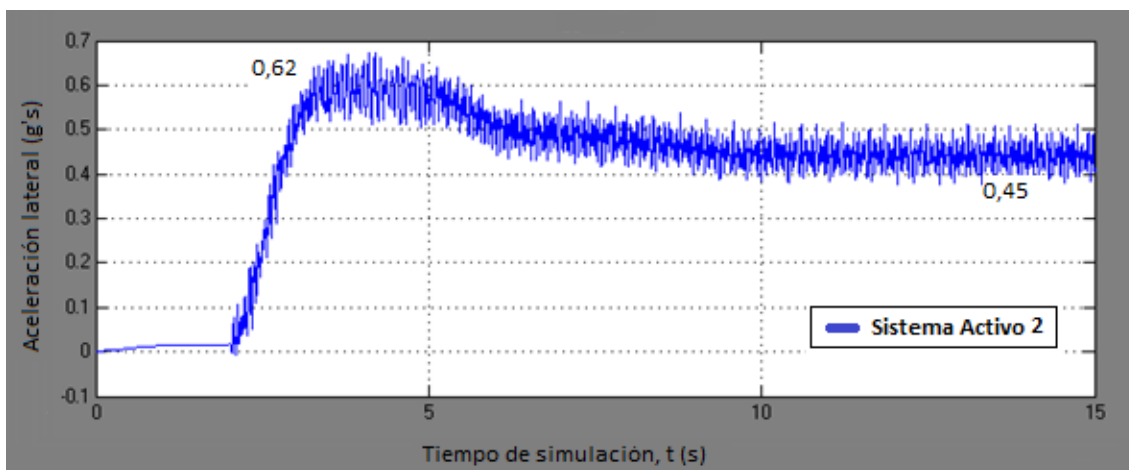


Figura 93. Aceleración lateral. Sistema Activo 2 - Ensayo 1 a 98 km/h

La aceleración también es algo mayor, alcanzándose los $0,62 g's$, como se muestra en la Figura 93.

7.3.2. Sistema Activo 2 - Ensayo 2

Los resultados obtenidos tras la realización de este ensayo se muestran en la Figura 94 y en la Figura 95.

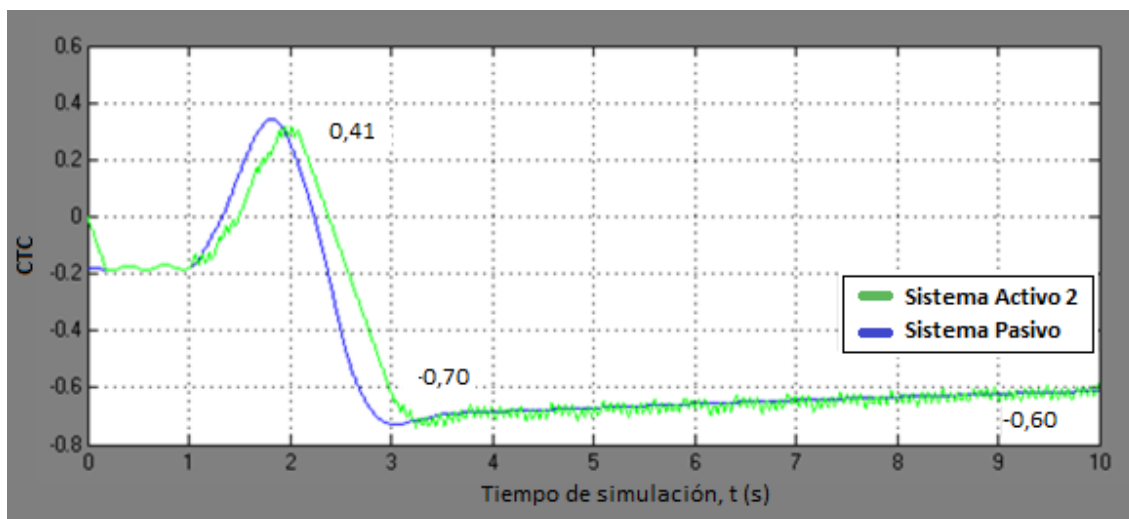


Figura 94. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 2 a 50 km/h

Los valores de la transferencia de carga no aumentan respecto de los obtenidos con el Sistema Activo 1, situándose el máximo en -0,7 en $t=3,1$ s.

En cuanto a la aceleración lateral (ver Figura 95), al igual que ocurre con la transferencia de carga, se encuentran valores muy similares a los obtenidos con el Sistema Activo 1.

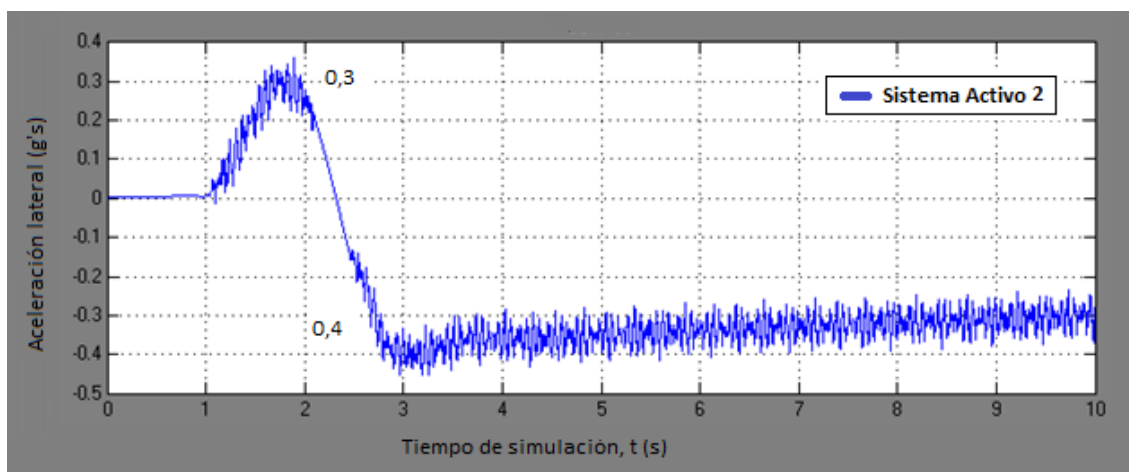


Figura 95. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 2 a 50 km/h

7.3.3. Sistema Activo 2 – Ensayo 3

Realizando el ensayo 3 los resultados muy similares a los obtenidos con el Sistema Activo 1. La transferencia de carga (ver Figura 96) alcanza en los mismos instantes de tiempo ($t=5$ s y $t=7$ s) los valores de ± 1 , aunque el vehículo no vuelca ni despega las ruedas del suelo.

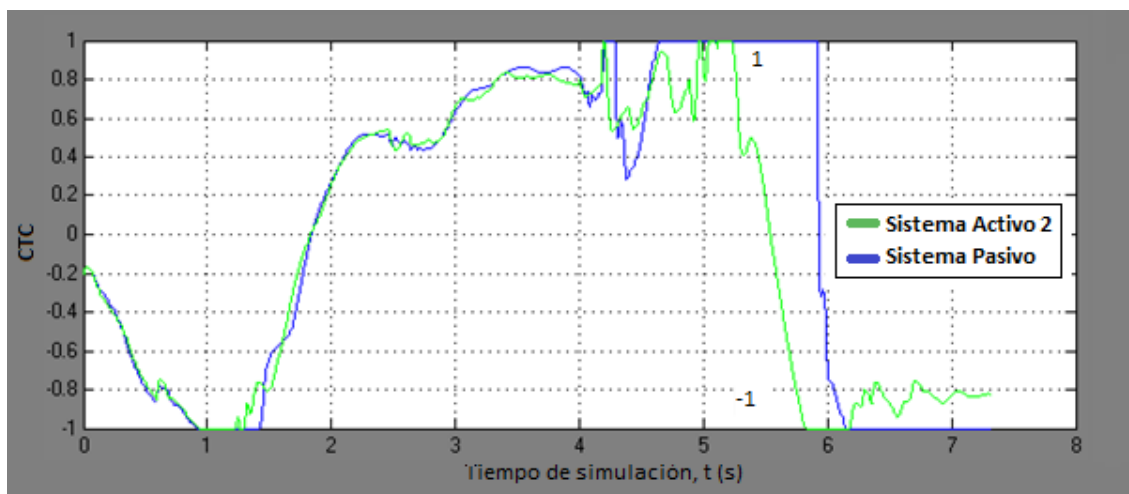


Figura 96. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 3 a 120 km/h

7.3.4. Sistema Activo 2 – Ensayo 4

En el ensayo a 70 km/h no se observan grandes diferencias en el comportamiento del vehículo. Al igual que sucedía con el Sistema Activo 1, los valores de transferencia de carga y aceleración lateral son muy similares a los obtenidos al realizar la simulación con el Sistema Pasivo aunque algo menores. En este caso el valor máximo de transferencia de carga es de 0,85. Las gráficas de transferencia de carga y aceleración lateral se muestran en la Figura 97 y la Figura 98.

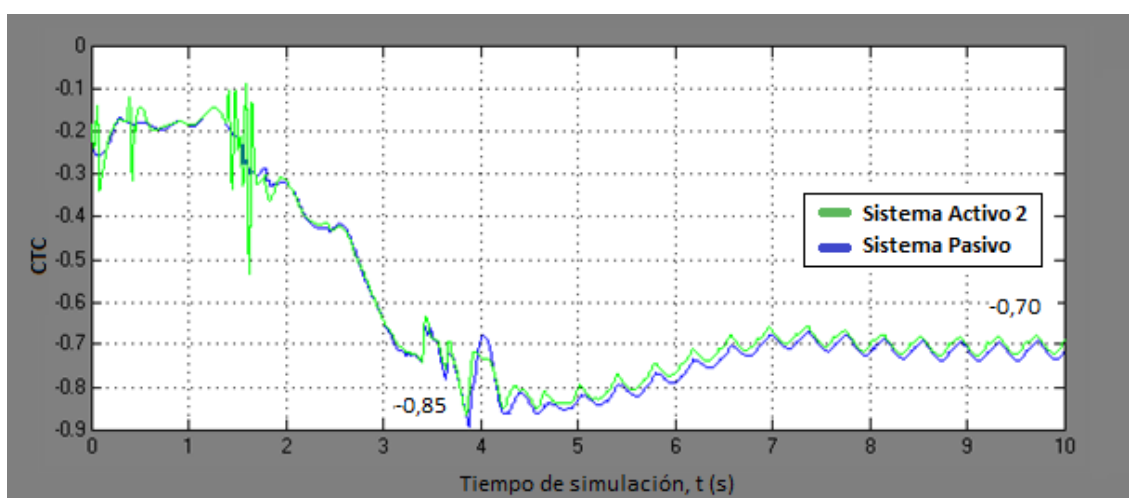


Figura 97. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 70 km/h

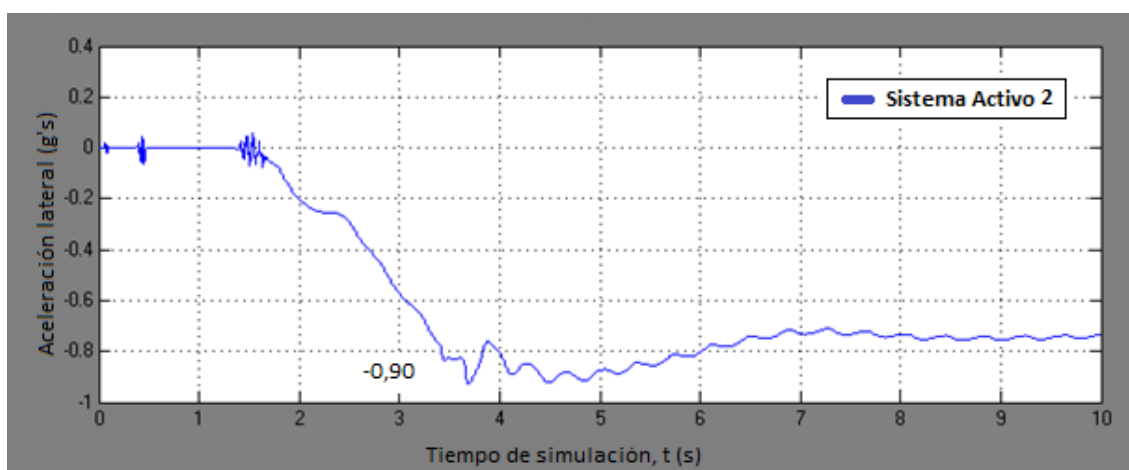


Figura 98. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 70 km/h

En la Figura 99 se pueden observar los vehículos de ensayo realizando este test. Se observa una ligera mejoría en el balanceo del vehículo al tomar la curva en el vehículo verde (con el Sistema Activo 2) respecto del azul (con el Sistema Pasivo).

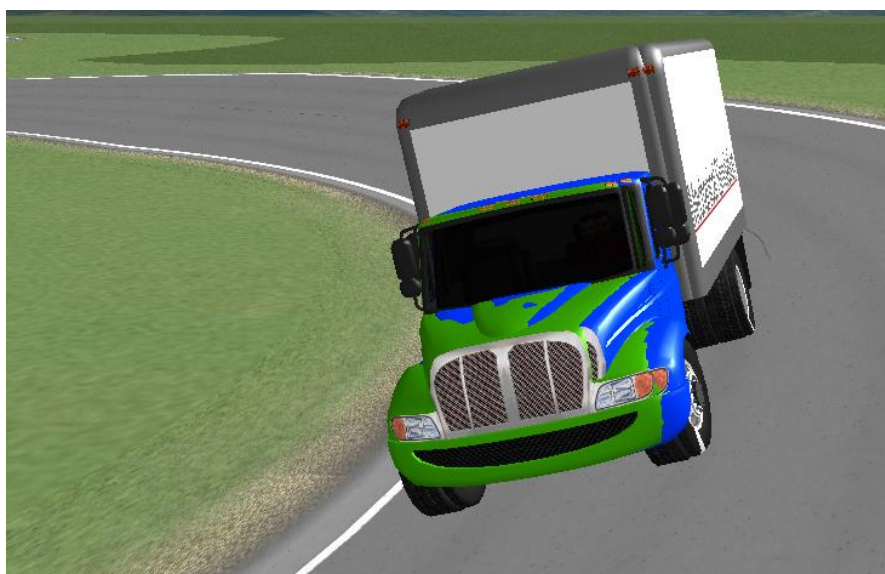


Figura 99. Vehículo en $t=5$ s, Ensayo 4 a 70 km/h

A continuación, se realiza el test a 78 km/h obteniendo los resultados para la transferencia de carga que se muestran en la Figura 100. Su valor alcanza en momentos puntuales el valor de -1 al igual que con el Sistema Activo 1, y también se evita el vuelco del vehículo.

En la Figura 101 se muestra la evolución del valor de la aceleración lateral a lo largo de la simulación.

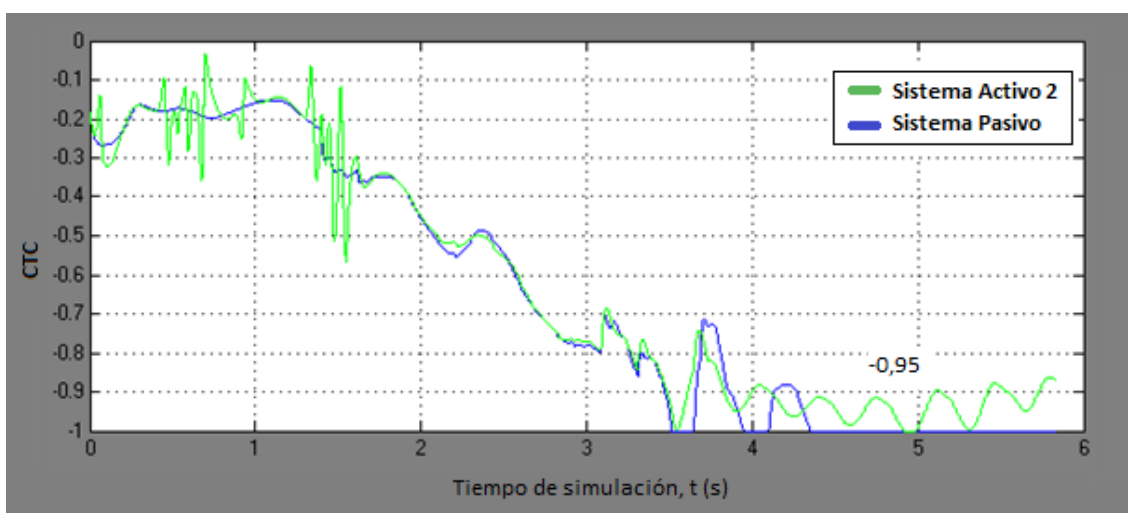


Figura 100. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 78 km/h

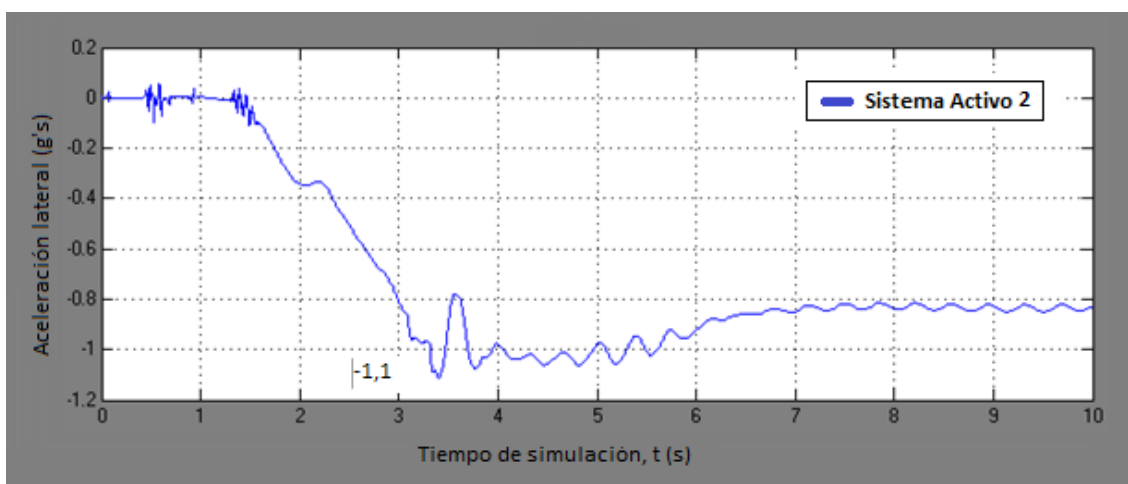


Figura 101. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 4 a 78 km/h

7.3.5. Sistema Activo 2 – Ensayo 5

En la Figura 102 se muestra la evolución de la transferencia de carga a lo largo de la simulación. Como se puede apreciar alcanza niveles similares a los que se alcanzaron en la sección 7.2.5, siendo la forma de la gráfica prácticamente idéntica. El valor máximo es 0,94 y se alcanza en $t=27$ s.

Por otra parte, cada uno de los valores se alcanza instantes antes que con el Sistema Activo 1. Como se puede ver en la Figura 103, el vehículo verde (con el Sistema Activo 2) es capaz de terminar el recorrido antes que el naranja (con el Sistema Activo 1).

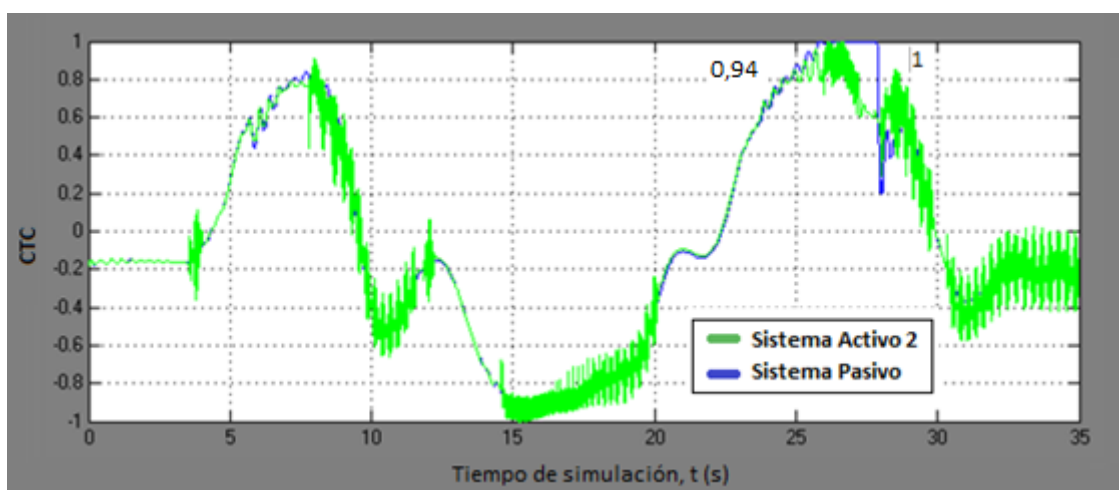


Figura 102. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 5 a 90 km/h



Figura 103. Diferencia de posición de los vehículos de ensayo en $t=35$ s

Como se pudo observar en la Figura 88 de la sección 7.2.5, con la utilización del sistema se produce una mayor tendencia al subviraje del vehículo. Utilizando esta configuración se reduce esta tendencia, al actuar menos sobre el eje delantero, como se muestra en la Figura 104, en la que aparecen los mismos vehículos de la Figura 103.



Figura 104. Vehículos de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16$ s (3)

En la Figura 105 se muestra la evolución de la aceleración lateral a lo largo de la simulación. Al igual que en el caso de la transferencia de carga, no hay un cambio destacable respecto de la que se muestra en la Figura 87, correspondiente a el Sistema Activo 1.

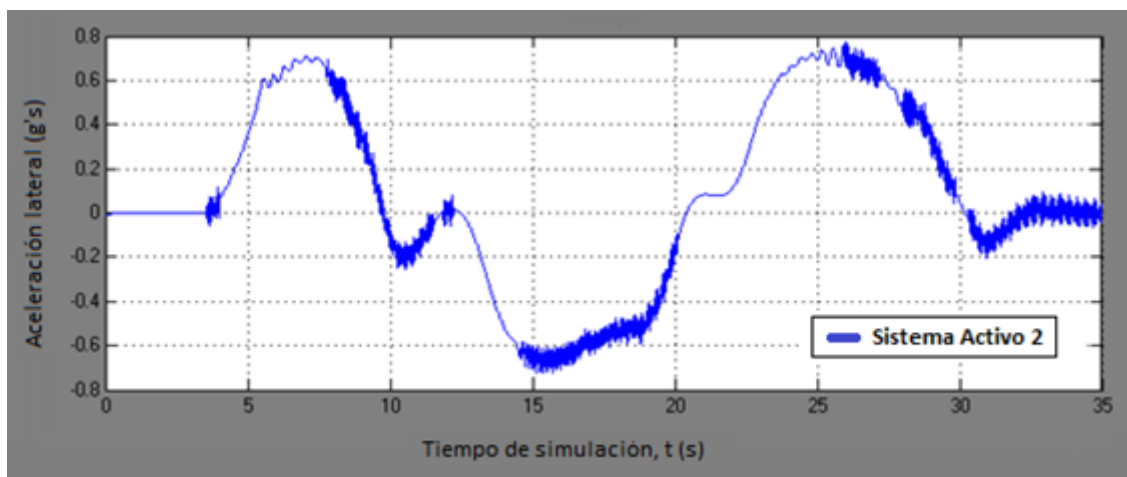


Figura 105. Aceleración lateral, Sistema Activo 2 - Ensayo 5 a 90 km/h

7.4. Sistema Activo 3

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el Sistema Activo 3 (ver sección 5.6.4).

7.4.1. Sistema Activo 3 - Ensayo 1

Para el ensayo 1 a 95 km/h se obtienen los resultados de simulación que se muestran en la Figura 106 y en la Figura 107.

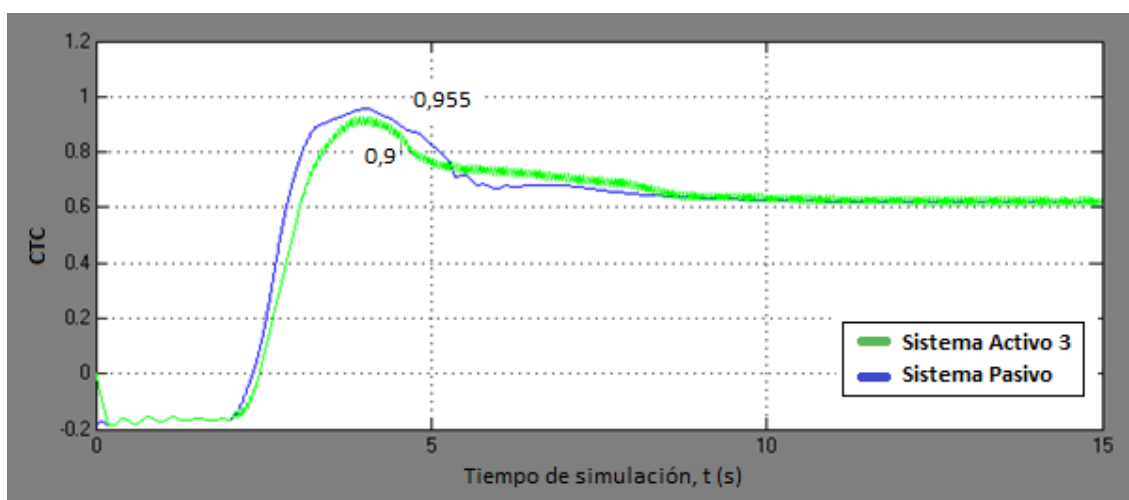


Figura 106. Transferencia de carga. Sistema Activo 3 - Ensayo 1 a 95 km/h

En la Figura 106 se muestra como se sigue reduciendo el coeficiente de transferencia de carga máximo. Al reducir la fuerza máxima ejercida y actuar solo en la parte trasera esta reducción es menor que la obtenida con el Sistema Activo 1 y el Sistema Activo 2.

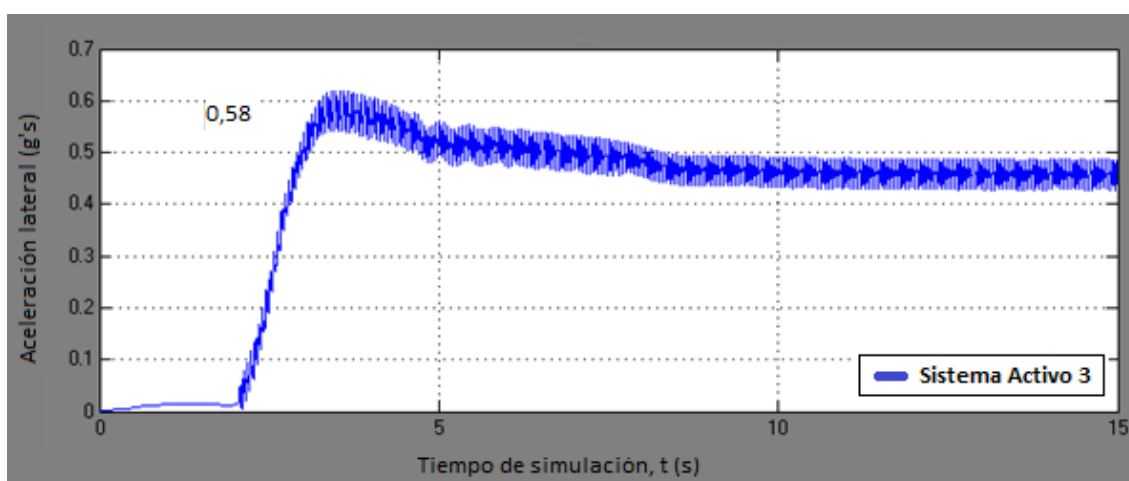


Figura 107. Aceleración lateral. Sistema Activo 3 - Ensayo 1 a 95 km/h

Como se muestra en la Figura 107 la aceleración no sufre un cambio apreciable en su valor máximo respecto del obtenido en las simulaciones con otros sistemas.

Si se aumenta la velocidad a 98 km/h se obtienen los resultados que se observan en la Figura 108.

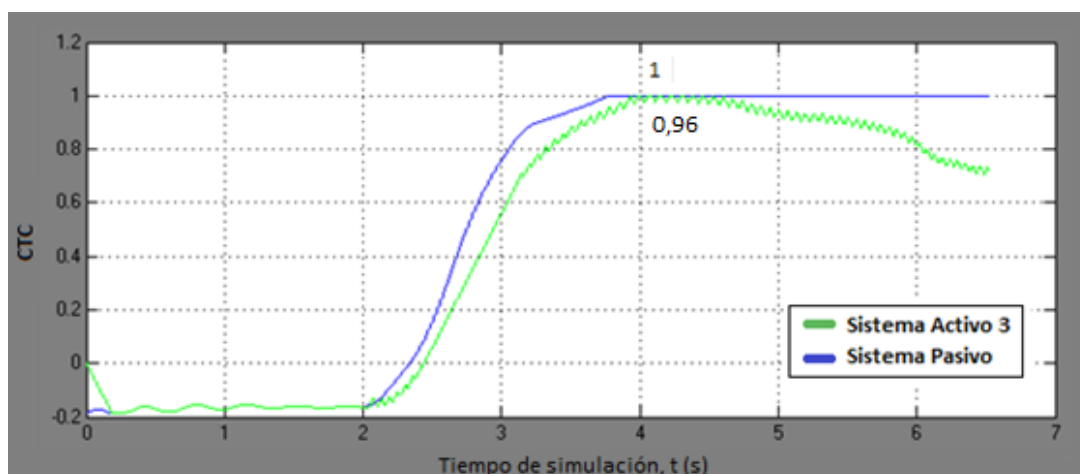


Figura 108. Transferencia de carga. Sistema Activo 3 - Ensayo 1 a 98 km/h

El Sistema Activo 3 evita el vuelco del vehículo, como se observa en la Figura 108, aunque se alcanza el valor de 0,96.

7.4.2. Sistema Activo 3 - Ensayo 2

Los resultados obtenidos tras la realización de este ensayo se muestran en la Figura 109 y en la Figura 110.

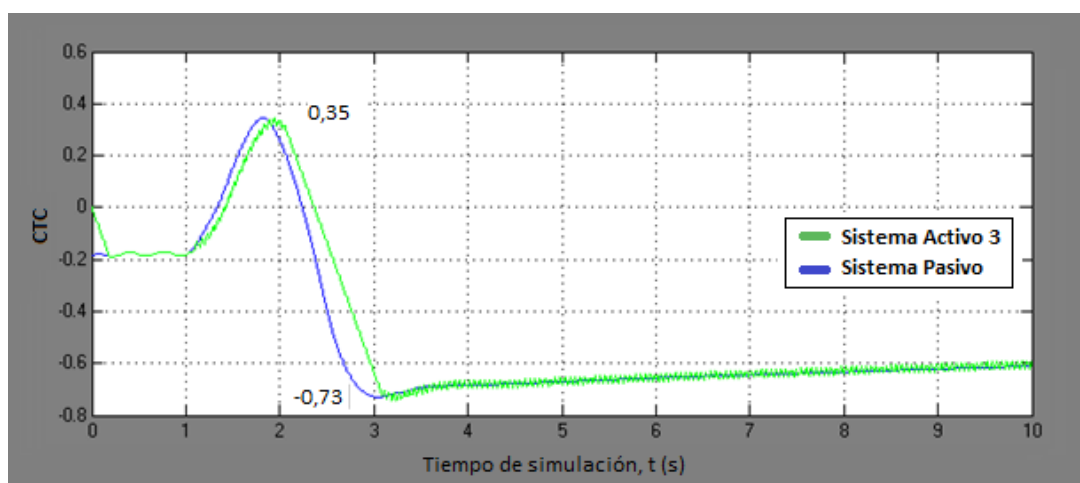


Figura 109. Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 2 a 50 km/h

La transferencia de carga no muestra ninguna reducción respecto a la que se da utilizando el Sistema Pasivo. Al igual que sucede con los otros sistemas el valor máximo se alcanza unos instantes después que en el ensayo inicial.

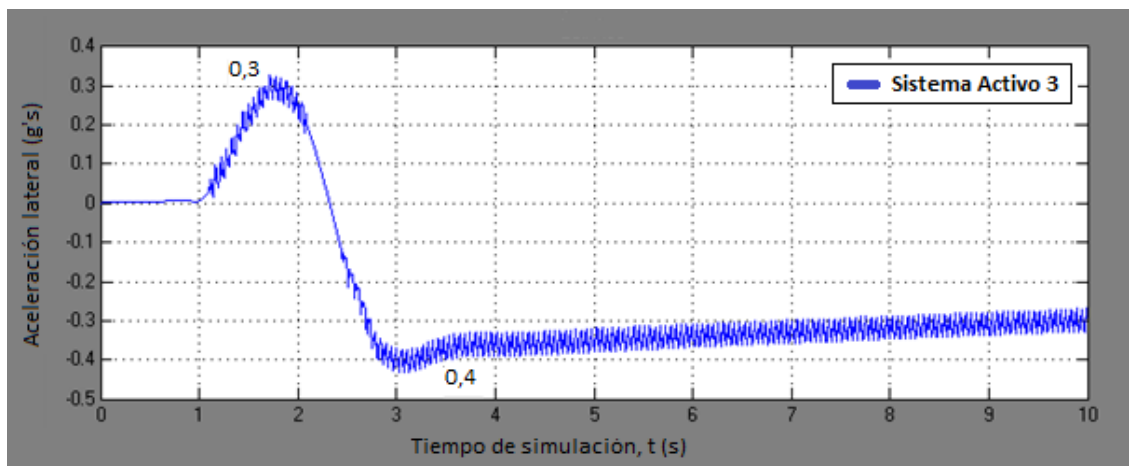


Figura 110. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 2 a 50 km/h

Como ya sucede en otros ensayos, la aceleración lateral no se reduce mediante el uso del sistema (ver Figura 110).

7.4.3. Sistema Activo 3 - Ensayo 3

En la gráfica de la Figura 111 se observa que se alcanza el valor máximo de transferencia en el instante $t=5$ s y en $t=6$ s al igual que con los sistemas anteriores. Sin embargo se alcanza en esta ocasión durante menos tiempo (ver secciones 7.2.3 y 7.3.3) y sin producirse el levantamiento de ninguna rueda. En el ensayo con el Sistema Pasivo se producía el vuelco en $t=6$ s, y en la Figura 111 se observa una reducción del coeficiente de transferencia a partir de este instante, lo que significa que el vehículo ha continuado con el recorrido.

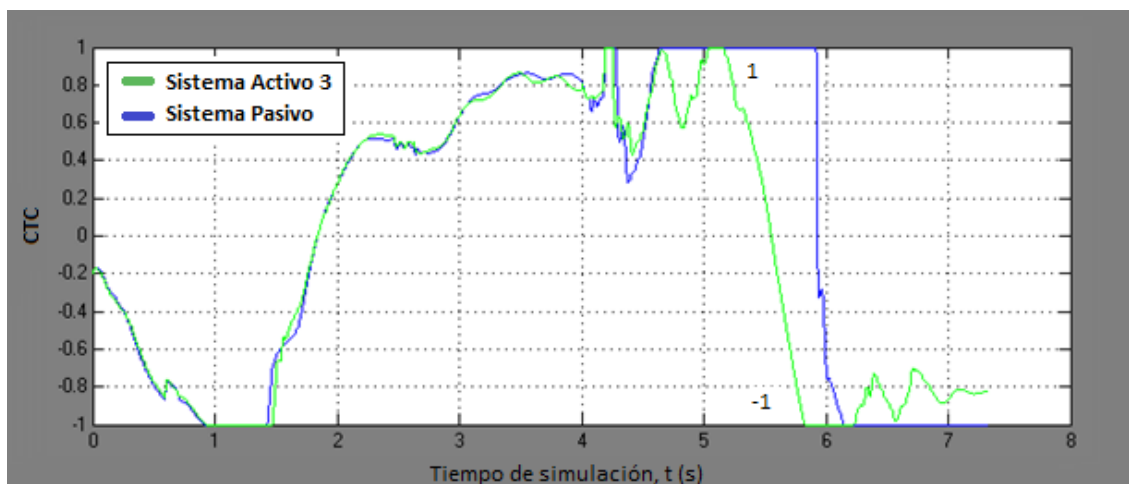


Figura 111. Transferencia de carga, Sistema Activo 2 - Ensayo 3 a 120 km/h

7.4.4. Sistema Activo 3 - Ensayo 4

En la Figura 112 se observa que el valor máximo de la transferencia de carga es el mismo que con el Sistema Activo 2. En este caso no existe diferencia apreciable entre el uso de uno u otro sistema.

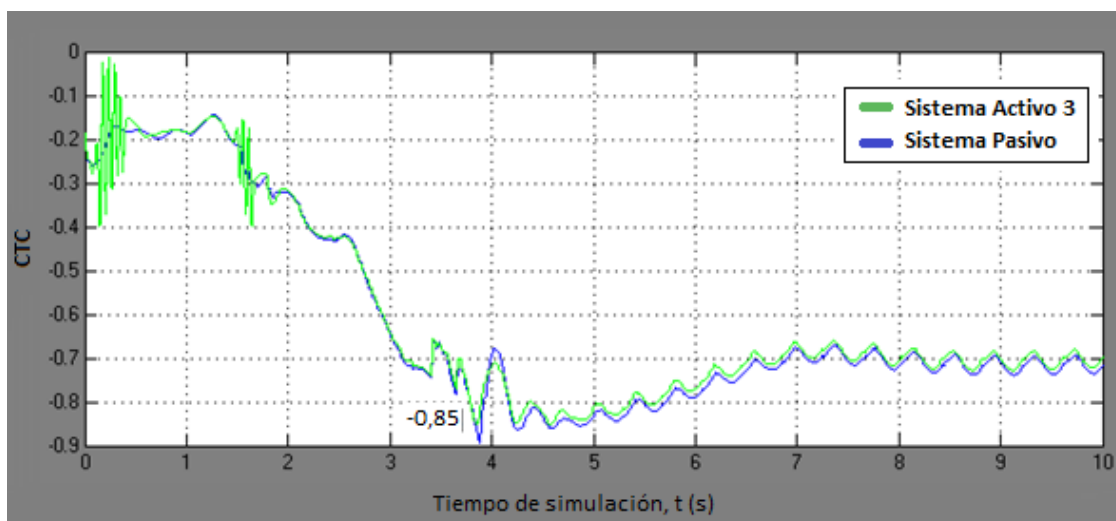


Figura 112. Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 70 km/h

Al igual que sucede con la transferencia de carga no hay diferencia apreciable entre la grafica de aceleración lateral al utilizar este sistema y el Sistema 2 (ver Figura 113).

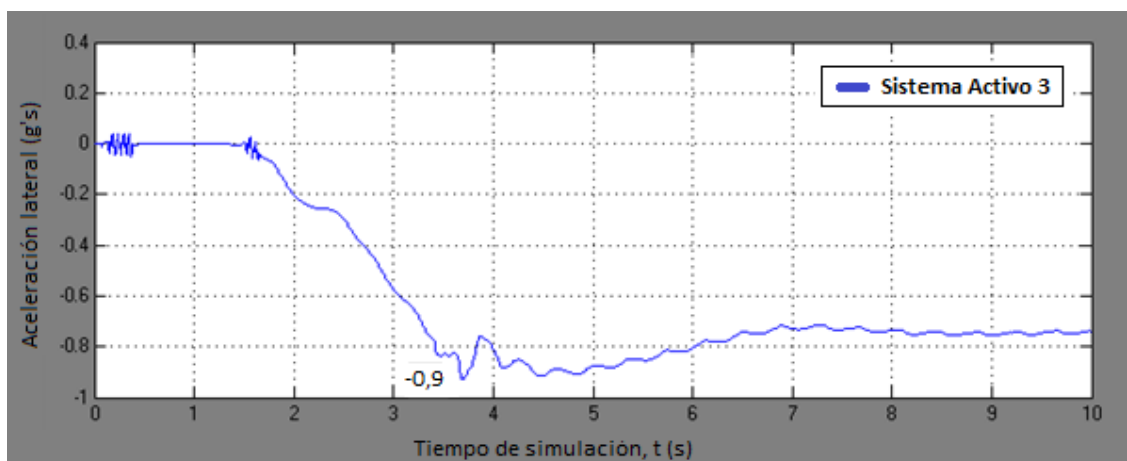


Figura 113. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 70 km/h



Figura 114. Vehículo en $t=5$ s, Ensayo 4 a 70 km/h (2)

En la Figura 114. Vehículo en $t=5$ s, Ensayo 4 a 70 km/h (2) Figura 114 se muestra una comparación entre el vehículo que utiliza el Sistema Activo 2 (verde) y el que utiliza el Sistema Activo 3 (blanco). Como se puede comprobar, no existe diferencia apreciable entre utilizar uno u otro sistema en este ensayo en concreto.

Realizando el ensayo a 78 km/h se obtiene la evolución del coeficiente de transferencia de carga que se muestra en la Figura 115. El vuelco del vehículo que utiliza el Sistema Pasivo se produce en $t=4,5$ s, momento en el que el coeficiente de carga alcanza el valor de -1 de forma irreversible. Con el Sistema Activo 3 se alcanza este valor en un único momento puntual, y comienza a disminuir a partir de $t=4$ s. El vuelco por tanto también se evita utilizando esta configuración mejorando incluso el comportamiento observado utilizando los otros sistemas activos.

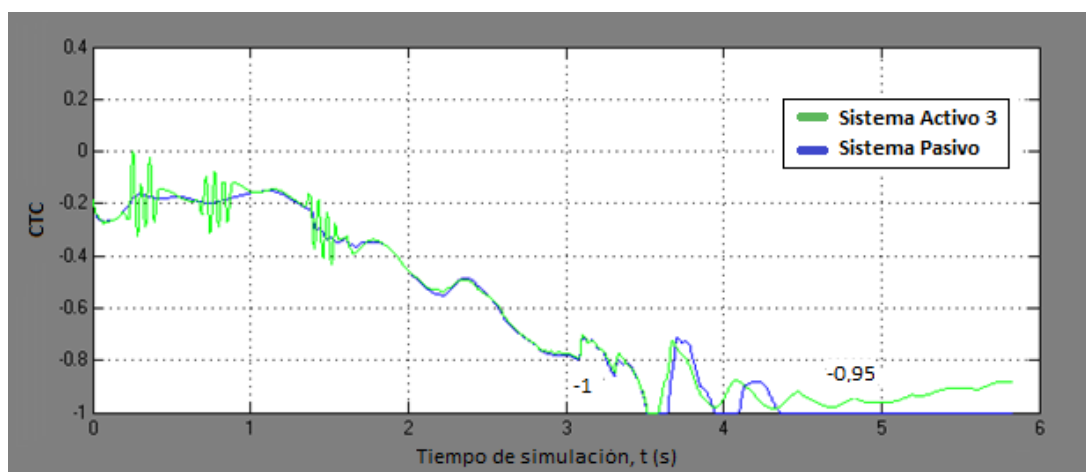


Figura 115 Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 78 km/h

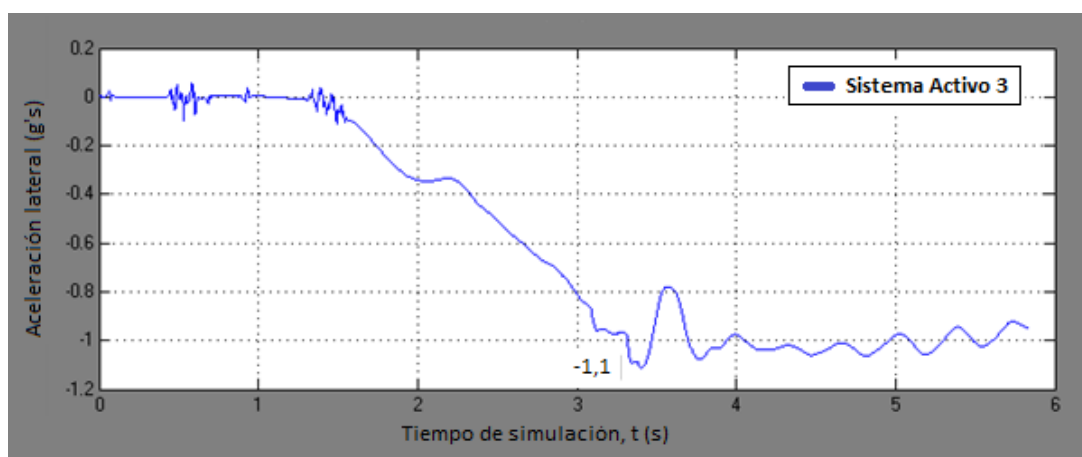


Figura 116. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 4 a 78 km/h

En la aceleración lateral (ver Figura 116) no se producen cambios significativos respecto de la gráfica con el Sistema Pasivo (ver Figura 66) al igual que sucede con otras simulaciones realizadas.

7.4.5. Sistema Activo 3 - Ensayo 5

En la Figura 117 se muestra la evolución de la transferencia de carga a lo largo de la simulación. Al igual que ocurre en la sección 7.4.4, la grafica tiene valores muy similares a los que se alcanzan con el Sistema Activo 1. Nuevamente se produce la mayor reducción del coeficiente de transferencia de carga en $t=27$ s, instante más crítico de la simulación, alcanzándose un valor para el coeficiente de transferencia de carga de 0,94.

Por otra parte, anular en el Sistema Activo 3 la actuación sobre el eje delantero, se evita el efecto indeseado de subviraje. En la Figura 118 aparecen el vehículo equipado con el Sistema Activo 2 (verde) y el equipado con el Sistema Activo 3 (blanco). Éste último se mantiene dentro del carril, lo que supone una mejora respecto de los otros sistemas.

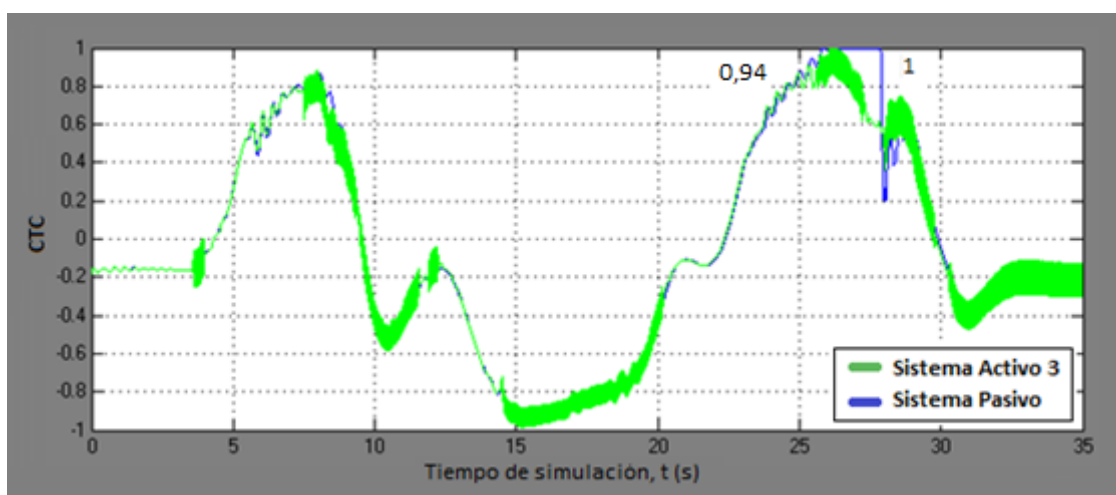


Figura 117. Transferencia de carga, Sistema Activo 3 - Ensayo 5 a 90 km/h



Figura 118 Figura 119. Vehículos de ensayo invadiendo carril contrario en $t=16$ s (4)

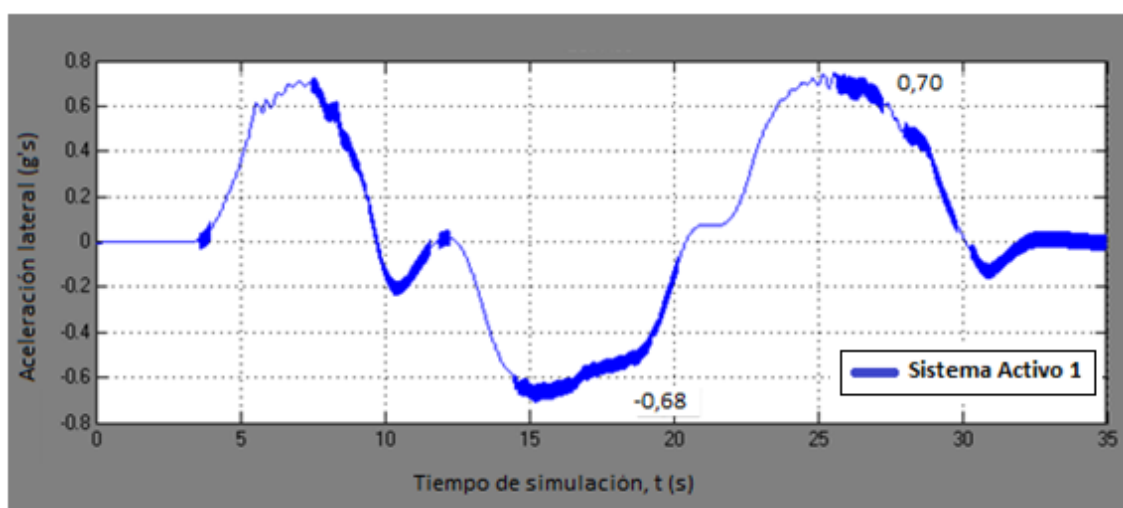


Figura 120. Aceleración lateral, Sistema Activo 3 - Ensayo 5 a 90 km/h

En la Figura 120 se muestra la evolución del valor de la aceleración lateral a lo largo de la simulación. En comparación con lo mostrado en la Figura 105 se obtiene cierta mejoría al utilizar la suspensión activa únicamente en el eje trasero.

7.5. Comparación de resultados

Realizados los diferentes ensayos con distintas configuraciones se puede determinar cuál es la mejor configuración del sistema. Todos los sistemas activos utilizados mejoran en mayor o menor medida el comportamiento del vehículo en situaciones de riesgo. El coeficiente de transferencia de carga normalizado se reduce en todos ellos entre 0,1 y 0,2 en los mejores casos. Además se evita el vuelco del vehículo con todos ellos, como se puede apreciar en la Tabla 13. En esta tabla se recogen los valores máximos del coeficiente de transferencia de carga (CTC) obtenidos en los ensayos realizados.

Tabla 13. Comparación de transferencia de carga (CTC)

	Velocidad (km/h)	Sistema Pasivo, CTC	Sistema Activo 1, CTC	Sistema Activo 2, CTC	Sistema Activo 3, CTC
Ensayo 1	95	0,95	0,87	0,83	0,9
	98	1 (VUELCO)	0,92	0,95	0,96
Ensayo 2	50	-0,73	-0,7	-0,7	-0,73
	-	-	-	-	-
Ensayo 3	120	1 (VUELCO)	1	1	1
	-	-	-	-	-
Ensayo 4	70	-0,89	-0,8	-0,85	-0,85
	78	1 (VUELCO)	-1	-1	-0,95
Ensayo 5	90	1	0,95	0,94	0,94

En ella se observa como el Sistema Activo 1 es el que más reduce el coeficiente de transferencia de carga normalizado. Sin embargo, al utilizarse se produce una tendencia al subviraje muy importante (ver secciones 7.2.5, 7.3.5 y 7.4.5). La reducción es del orden de 0,2 para todos los casos excepto para el Ensayo 3. El coeficiente alcanza el valor de 1, aunque se evita el vuelco y las ruedas no se despegan del suelo (ver sección 7.2.3).

El Sistema Activo 2 muestra un comportamiento menos influente que el Sistema Activo 1. En Tabla 13 se observa como los valores máximos alcanzados son algo mayores que los correspondientes al Sistema Activo 1. A pesar de ser menos intrusivo que el primero, no produce ningún tipo de mejora en la tendencia al subviraje observada.

De todos los sistemas, el Sistema Activo 3 es el menos intrusivo. La reducción del coeficiente de transferencia de carga es menor que en los otros dos (en torno a 0,1 dependiendo del ensayo). Sin embargo, en el ensayo 5, el CTC alcanza valores menores que los obtenidos con los otros sistemas (ver Tabla 13 y Figura 128). Por otra parte, al no actuar sobre el eje delantero, no produce la tendencia al subviraje observada con las otras configuraciones. Además, como se puede apreciar en la Figura 121 se produce una mejora en el paso por curva respecto al vehículo que utiliza el Sistema Pasivo (ver Figura 68).



Figura 121. Mejora en el paso por curva. Sistema Pasivo - Sistema Activo 3

En la Figura 122, la Figura 123, la Figura 124, la Figura 125, la Figura 126 la Figura 127 y en la Figura 128 se muestran superpuestas las gráficas de evolución de la transferencia de carga a lo largo de cada simulación. En ellas se puede observar la variación entre los valores máximos del CTC mostrada en la Tabla 13 así como la comparación del valor en otros instantes de tiempo.

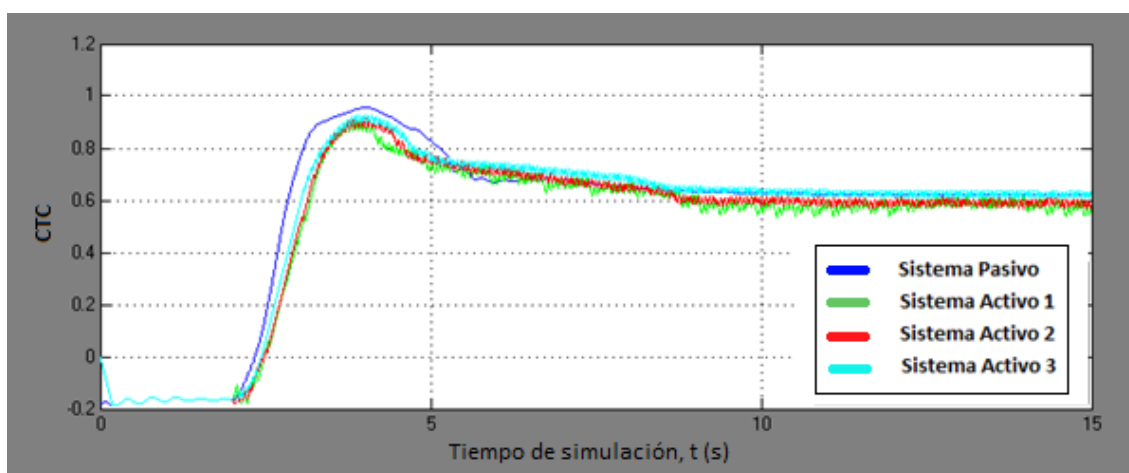


Figura 122. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 1 - 95km/h

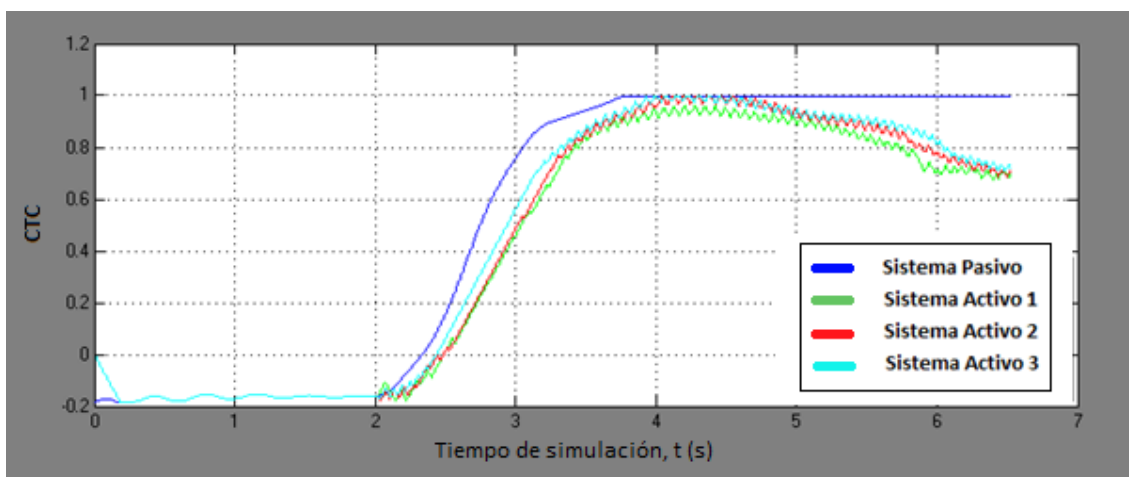


Figura 123. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 1 – 98 km/h

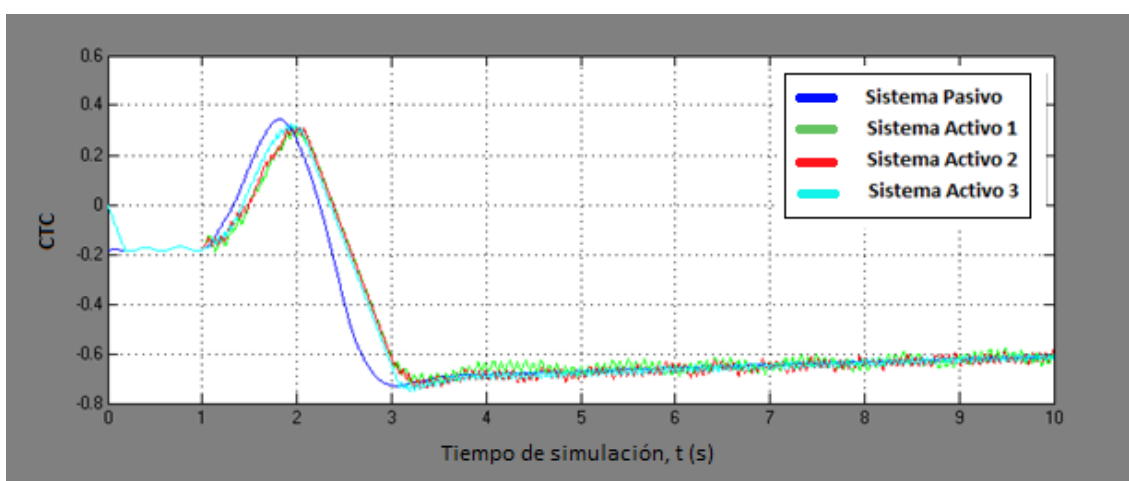


Figura 124. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 2 – 50 km/h

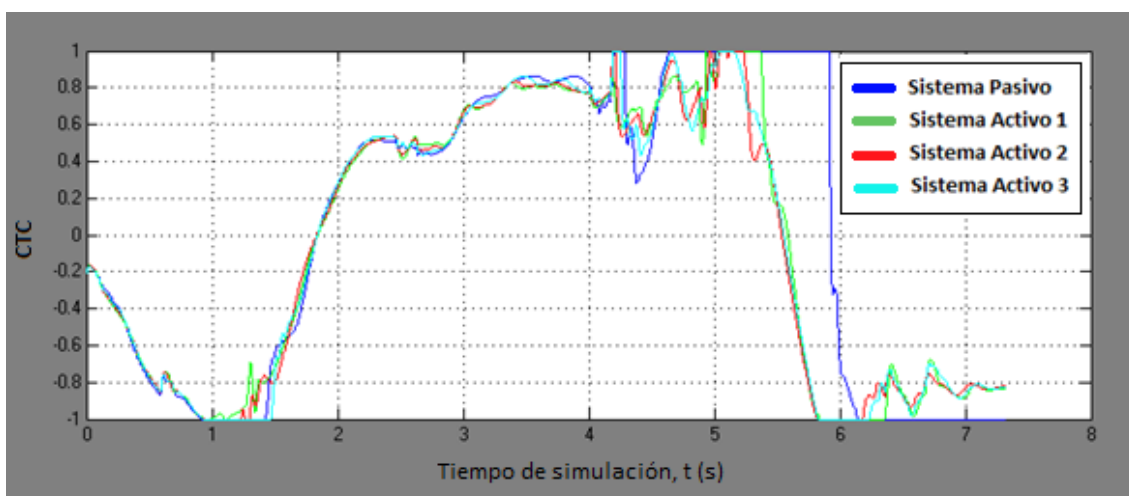


Figura 125. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 3 – 120 km/h

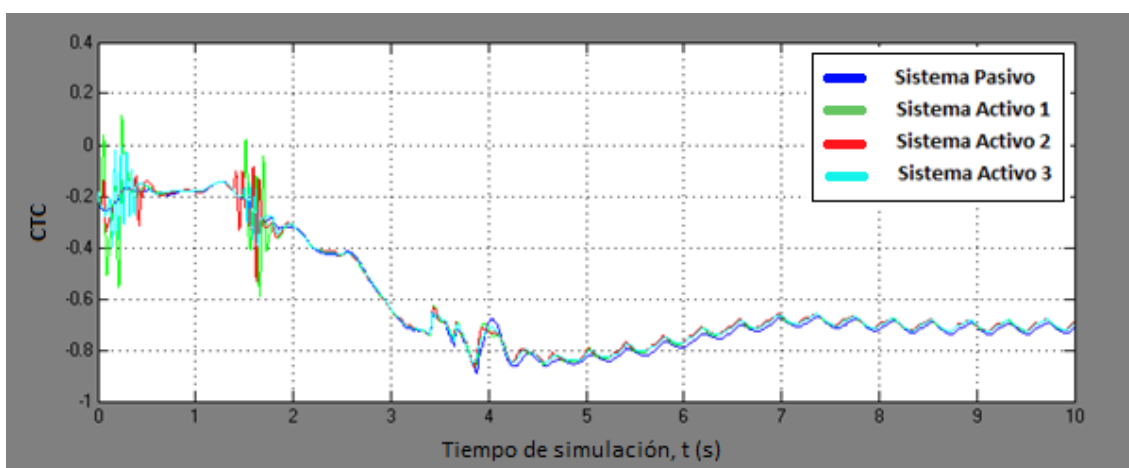


Figura 126. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 4 – 70 km/h

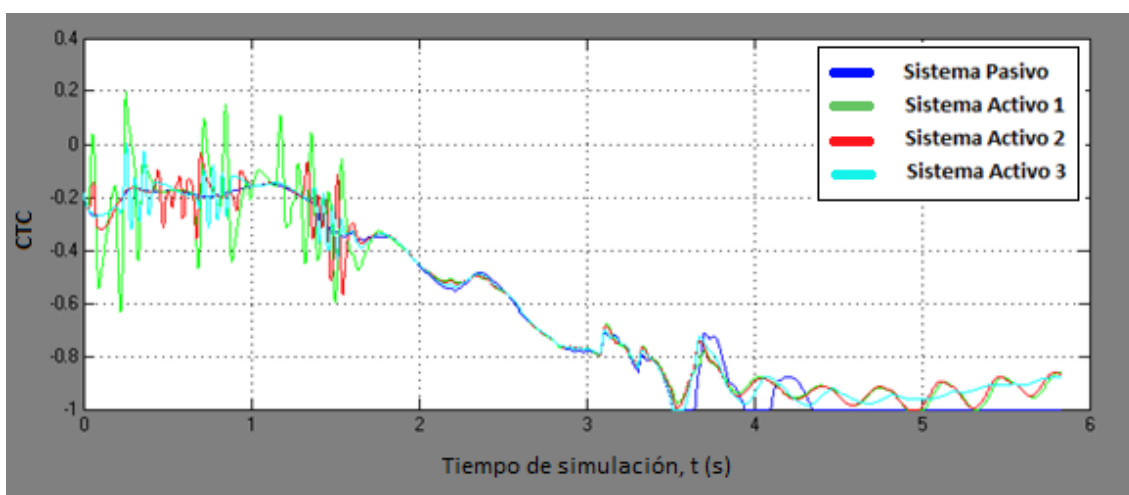


Figura 127. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 4 – 78 km/h

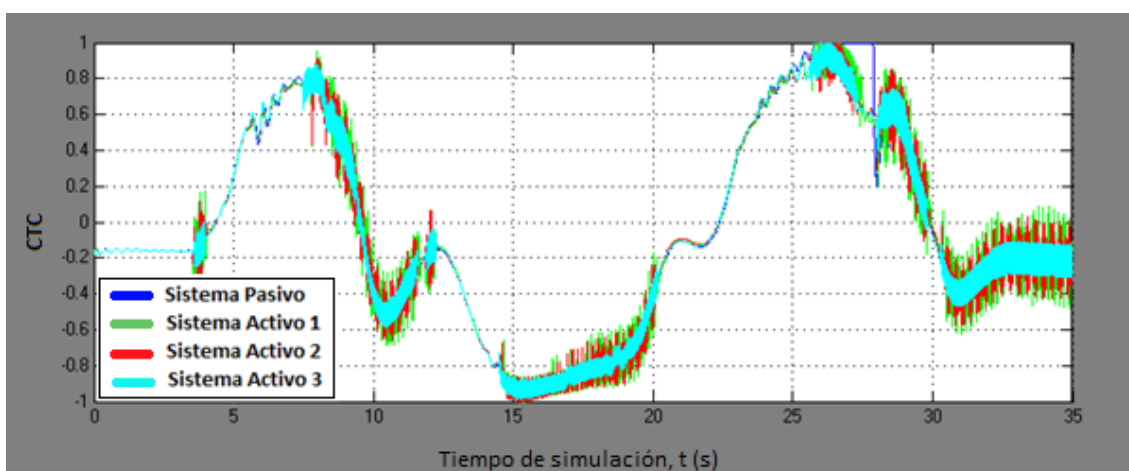


Figura 128. Comparación de transferencia de carga. Ensayo 5 – 90 km/h

8. Conclusiones y trabajos futuros

En este proyecto se ha diseñado un sistema de control antivuelco que permite mejorar el comportamiento dinámico de un camión durante el paso por curva. Para ello se ha hecho uso de los entornos MATLAB – SIMULINK y TruckSim, que han permitido además la realización de simulaciones que muestran esta mejora en el comportamiento del vehículo simulado.

La lógica difusa ha permitido hacer la programación del sistema de una manera muy intuitiva. Sin embargo para llegar al diseño final del programa, ha sido necesaria la realización de numerosas versiones previas. En estas primeras versiones se utilizó un único bloque FLC en SIMULINK, que controlaba los actuadores situados tanto en el eje trasero como en el delantero. Como variables de entrada al bloque FLC (ver sección 4.4.1) se utilizó en un primer momento el ángulo de vuelco del vehículo completo y la velocidad angular de guiñada, en vez del ángulo relativo de vuelco y la velocidad a la que se produce. La realización de estos cambios se suma a la gran cantidad de juegos de reglas (ver sección 4.4.3) que se han probado en las diferentes simulaciones.

Gracias a todas estas pruebas se pudo determinar que era necesario un sistema adicional que ajustase el funcionamiento del conjunto de forma automática en función de las características del entorno en el que se realiza la simulación.

A la hora de elegir el tipo de pruebas a las que se debía someter el vehículo modelado se ha tratado de evaluar aquellas simulaciones que podían ofrecer situaciones lo más cercanas a la realidad.

El último paso ha sido determinar el tipo de actuación requerido en cada eje. Por ello se han realizado ensayos con multitud de tipos de sistema, entre los que han destacado los que se muestran en la sección 5.6.

8.1. Conclusiones

Una vez realizados los distintos ensayos con los diferentes sistemas activos se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Los sistemas que mejor han funcionado han sido aquellos en los que la fuerza en el eje trasero era mayor, dado que cuando un vehículo comienza el vuelco, éste comienza generalmente al levantarse una de las ruedas traseras del camión.
- Una actuación en la suspensión del eje delantero puede reducir la transferencia de carga, pero a su vez puede afectar negativamente al comportamiento del vehículo en otras maniobras como se ha visto en las simulaciones. Por ello aquellas realizadas con el Sistema Activo 3 han ofrecido mejores resultados en aspectos en un principio no se habían tenido en cuenta, como ayudar a mantener la trazada correcta en el paso por curva, además de evitar el vuelco del camión.



- La variación de la forma y tipo de funciones de inclusión no es determinante en el comportamiento final del vehículo. Se puede conseguir un retardo (o adelanto) en la actuación del sistema modificando el área de solapamiento entre ellas. Sin embargo, este efecto es despreciable ante la posibilidad de cambiar el factor de multiplicación a la salida del bloque FLC (ver secciones 5.5 y 5.6).
- El valor de las fuerzas que debe realizar cada uno de los actuadores es del orden de 20000 N, mismo orden de magnitud que el peso que soporta cada una de las ruedas cuando el vehículo se encuentra en un terreno llano y parado. Por ello, al realizar los ensayos con una carga de casi 7 toneladas, la reducción del coeficiente de transferencia de carga es únicamente del orden de 0,2 (ver Tabla 13). Una mayor fuerza por parte de los actuadores permitiría reducir en mayor medida la transferencia de carga, pero encarecería el sistema.
- La aceleración lateral que sufre el vehículo no sufre variaciones significativas al utilizar este sistema de control antivuelco, precisamente debido a la gran masa del vehículo.

8.2. Trabajos futuros

El siguiente paso en el desarrollo de este proyecto es la adaptación del sistema para trabajar con suspensión semiactiva en vez de suspensión activa. Para ello es necesario, en primer lugar, situar un filtro en la entrada al bloque "TruckSim S-Function". Su misión debe ser garantizar que la fuerza ejercida se produzca únicamente en la dirección de desplazamiento del amortiguador en cada instante de tiempo. Se trata de una modificación sencilla, pero que afecta de forma importante al funcionamiento del resto del sistema. Será necesario incluir un nuevo juego de normas, además de utilizar nuevos parámetros de control, como es la velocidad de desplazamiento del amortiguador.

Además es posible implementar este programa sobre un sistema FPGA. De esta forma, TruckSim enviaría la información relacionada con el modelo a un hardware en vez de a SIMULINK. Con ello se puede obtener una respuesta más real del vehículo al utilizar el sistema.

Finalmente es posible la aplicación de este mismo sistema sobre un modelo de vehículo real, es decir, sustituir el camión modelado que se ha utilizado en este proyecto (modelo predeterminado en TruckSim) por un modelo personalizado. De esta forma, en un futuro, se podría comprobar si los resultados de las simulaciones se acercan a la realidad.



9. Referencias

- [1]. Consumerreports.org, (2015). *Car Rollover 101 - Consumer Reports*. [online]. Disponible en: <http://www.consumerreports.org/cro/2012/02/rollover-101/index.htm> [Accedido en abril de 2015].
- [2]. Jiménez Gálvez, J. *La DGT sanciona a 5.400 furgonetas al crecer la mortalidad en sus accidentes*. El País, (2015). [online]. Disponible en: http://politica.elpais.com/politica/2015/02/18/actualidad/1424269848_118181.html [Accedido en abril de 2015].
- [3]. Jiménez Gálvez, J. *Enero cierra con un 44% más de muertos en las carreteras*. El País, (2015). [online]. Disponible en: http://politica.elpais.com/politica/2015/02/02/actualidad/1422875135_198749.html [Accedido en abril de 2015].
- [4]. Es.mathworks.com, (2015). *CarSim, TruckSim, BikeSim - Simulation of the vehicle dynamics for SIL, HIL, and Driving Simulators*. [online]. Disponible en: http://es.mathworks.com/products/connections/product_detail/product_35397.html [Accedido en abril de 2015].
- [5]. McKeegan, N. *Retrofittable anti-rollover truck system recognized*. Gizmag (2010). [online] Disponible en: <http://www.gizmag.com/anti-rollover-truck-system/17009/> [Accedido en marzo de 2015].
- [6]. Haldex Trailer Roll Stability (TRS) L20578W Rev. 6/10. Haldex (2015). Disponible en: http://www.haldex.com/Documents/hbsna/ABS/L20578W_TRS_Brochure_6-10.pdf [Accedido en marzo de 2015].
- [7]. MERITOR - WABCO, (2008). *RSS plus™ Roll Stability Support For Trailers*. [online]. Disponible en: <http://www.fortitudemfg.com/assets/docs/RSS-Sell-Sheet.pdf> [Accedido en marzo de 2015].
- [8]. Volkswagen-vans.co.uk, (2015). *Active Rollover Protection (ARP)*. [online]. Disponible en: <https://www.volkswagen-vans.co.uk/glossary/a/active-rollover-protection-%28arp%29> [Accedido en marzo de 2015].
- [9]. Aficionadosalamecanica.net, (2014). *Sistemas de Suspensión: suspensiones regulables o pilotadas*. [online]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension8.htm> [Accedido en febrero de 2015].
- [10]. Cupich Rodríguez, M. y Elionzo Garza, F. (1998). *Amortiguadores magnetoreológicos*.
- [11]. Reorganización de las partículas magnéticas en amortiguadores magnetoreológicos. (n.d.). [Imagen]. Disponible en: <http://img.interempresas.net/fotos/901366.jpeg> [Accedido en febrero de 2015].



-
- [12]. *Delphi MagneRide*. (2002). km77.com. [online] Disponible en: <http://www.km77.com/tecnic/bastidor/magneride/t02.asp> [Accedido en febrero de 2015].
- [13]. BMW Motorrad España, (n.d.). *Suspensión, Dynamic ESA*. [online]. Disponible en: http://www.bmw-motorrad.es/es/es/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.es/es/es/technology_detail/suspension/dynamic_ESA.html¬rack=1 [Accedido en febrero de 2015].
- [14]. Aficionadosalamecanica.net, (2014). *Sistemas de suspensión: suspensiones variables controladas*. [online]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension4.htm> [Accedido en febrero de 2015].
- [15]. Alguacil, E. (2011). *DS, el coche del siglo XX*. Citroends.es. [online]. Disponible en: http://www.citroends.es/la_fabrica_hidraulica.html [Accedido en mayo de 2015].
- [16]. Meiners, J. (2010). *Mercedes-Benz Magic Body Control*. Car and Driver. [online]. Disponible en: <http://www.caranddriver.com/news/mercedes-benz-news-magic-body-control-system-driven> [Accedido en abril de 2015].
- [17]. Open-Road Audi, (n.d.). *Dynamic Ride Control*. [online] Disponible en: http://www.audi.ca/ca/openroadaudi/home/tools/advice/glossary/dynamic_ride_control.bro [Accedido en abril de 2015].
- [18]. Audisrs.com, (n.d.). *DRC*. [online]. Disponible en: http://audisrs.com/archive/drc-information__o_t__t_163.html [Accedido en abril de 2015].
- [19]. BOSE, (n.d.). *Automotive Technologies: BOSE Suspension System*. [online] Disponible en: http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/index.jsp [Accedido en abril de 2015].
- [20]. Martín del Brío, B. and Sanz Molina, A. (2006). *Redes neuronales y sistemas borrosos*. 3ª ed. Ra-Ma. ISBN 84-7897-743-0
- [21]. MathWorks, (2011). *Water Level Control in a Tank*. [imagen]. Disponible en: <http://es.mathworks.com/help/fuzzy/examples/water-level-control-in-a-tank.html> [Accedido en mayo de 2015].
- [22]. NZCI, (2011). *Roll Over diagram*. [imagen]. Disponible en: <http://www.nzci.co.nz/services/specialist/hmv-roll-over/> [Accedido en mayo de 2015].
-



[23]. López Boada, M., López Boada, B., Gauchia, A., Quesada, A. y Díaz, V. (2006). *FUZZY-BASED ROLL CONTROL FOR A SINGLE UNIT HEAVY VEHICLE*.

[24]. *Real Decreto 1428/2003*, de 21 noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial.